

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Numerická simulace svařování elektrono-
vým paprskem**

**Numerical Simulation of Elecron Beam
Welding**

Student:

Bc. František Vysoudil

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. František Vysoudil**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Numerická simulace svařování elektronovým paprskem**
Numerical Simulation of Elecron Beam Welding
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii svařování elektronovým paprskem.
2. Charakterizujte teplotní zdroj pro numerickou simulaci elektronovým paprskem.
3. Proved'te charakteristiku použitého základního materiálu s ohledem na numerickou simulaci svařování.
4. Navrhněte a realizujte numerický model vybraného svarového spoje výsledky porovnejte s experimentem.
5. Proved'te diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
HRIVŇÁK, I. *Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin*. Veda 1989.
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.
SCHULTZ, Helmut. *Electron beam welding*. Elsevier, 1994.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry

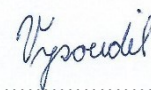


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20. května

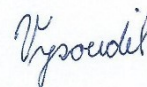


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. května 2019



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. František Vysoudil

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bohuslavice 36, 78972

Anotace DIPLOMOVÉ práce

VYSOUDIL, Bc. František. *Numerická simulace svařování elektronovým paprskem*. Ostrava, 2019, 66 s. Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie. Vedoucí práce Ing. Vladislav Ochodek.

Diplomová práce se zabývá vytvořením numerické simulace svařování elektronovým paprskem. Numerické simulace byly vytvořeny v softwaru Simufact welding 8.0. Byla porovnávána jednotlivá nastavení síťování a teplotních zdrojů. Po výpočtu procesu, byla vyhodnocena teplotní a napěťová analýza svarového spoje. Dále byla simulace srovnána se skutečným experimentem. Nejprve pomocí tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje a po té tepelným cyklem, který byl naměřen pomocí termočlánků.

Klíčová slova: numerická simulace, simufact welding 8.0, elektronové svařování, síťování, tepelný zdroj

ANNOTATION OF DIPLOM THESIS

VYSOUDIL, Bc. František. *Numerical Simulation of Elecron Beam Welding*. Ostrava, 2019, 66 p. Master Thesis. VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology. Thesis head: Ing. Vladislav Ochodek.

This master thesis focused on numerical simulation of electron beam welding. Numerical simulations were created in Simufacturing 8.0. Individual meshing and temperature settings have been compared. After the process calculation, the temperature and stress analysis of the weld joint was evaluated. Next, the simulation was compared with the actual experiment. First, using the heat-affected area of the weld joint and then using thermal cycles that were measured with thermocouples.

Key words: numerical simulation, simufact welding 8.0, electron beam welding, meshing, heat source

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ | 7 |
| ÚVOD | 10 |
| 1 VLASTNOSTI SVAŘOVANÉHO MATERIÁLU..... | 11 |
| 1.1 CHEMICKÉ SLOŽENÍ..... | 11 |
| 1.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI | 12 |
| 2 SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM PAPRSKEM..... | 17 |
| 2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP | 18 |
| 2.2 PRINCIP PROCESU | 19 |
| 2.3 VYCHÝLOVÁNÍ PAPRSKU | 21 |
| 2.4 DRUHY PROCESU..... | 22 |
| 2.5 SVAŘITELNOST..... | 23 |
| 2.6 VÝHODY PROCESU..... | 24 |
| 2.7 SVAŘOVÁNÍ REÁLNÉHO VZORKU TECHNOLOGIÍ EBW | 24 |
| 3 NUMERICKÁ SIMULACE | 29 |
| 3.1 SIMUFACT WELDING 8.0 | 29 |
| 3.2 VSTUPNÍ PARAMETRY PRO TVORBU PROCESU | 31 |
| 3.3 VÝPOČET PROCESU..... | 34 |
| 3.4 VÝSLEDKY NUMERICKÉ SIMULACE..... | 35 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 47 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 48 |
| SEZNAM TABULEK | 50 |
| PŘÍLOHA 1 – VYTVOŘENÍ PROCESU NUMERICKÉ ANALÝZY..... | 51 |
| PŘÍLOHA 2 – MATERIÁLOVÁ DATA | 64 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

| Značka | Fyzikální jednotka | Význam |
|--------------|------------------------|---|
| ČSN | [-] | České technické normy |
| EN ISO | [-] | Evropské normy a mezinárodní organizace pro normalizaci |
| AISI | [] | Institut sdružení amerických výrobců oceli |
| DIN | [] | Německý ústav pro průmyslovou normalizaci |
| CEV | [mm] | Uhlíkový eqivalent |
| CET | [kg/h] | Uhlíkový eqivalent pro legování oceli |
| PCM | [-] | Uhlíkový eqivalent |
| R_m | [MPa] | Pevnost v tahu |
| $R_{p\ 0,2}$ | [MPa] | Mez kluzu |
| A | [% v 50 mm] | Poměrné prodloužení |
| HR -B | [HV] | Tvrdost podle Rockwella |
| HB | [HB] | Tvrdost podle Brinella |
| ρ | [[Kg.m ⁻³] | Hustota |
| E | [GPa] | Modul pružnosti |
| α | [10 ⁻⁶ K] | Součinitel tepelné roztažnosti |

| | | |
|----------------|---------------------------------------|---|
| λ | [W.m. ⁻¹ K ⁻¹] | Tepelná vodivost |
| EBW – HV | [-] | Svařování elektronovým paprskem – vysoko vakuové |
| EBW | [-] | Svařování elektronovým paprskem |
| EBW-MV | [-] | Svařování elektronovým paprskem – středo vakuové |
| EBW-MV | [-] | Svařování elektronovým paprskem – bez vakuové |
| U | [kV] | Elektrické napětí |
| TIG | [-] | Svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu |
| MIG | [-] | Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu |
| I _s | [mA] | Svařovací proud |
| U _s | [kV] | Svařovací napětí |
| P | [kW] | Výkon elektrického oblouku |
| v _s | [mm.s ⁻¹] | Svařovací rychlost |
| TOO | [-] | Tepelně ovlivněná oblast |
| 3D | [-] | Trojrozměrný model součásti |
| 131 | [-] | Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu |

| | | |
|-------|------|---|
| 141 | [-] | Svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu |
| 135 | [-] | Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu |
| 51 | [-] | Elektronové svařování |
| 52 | [-] | Laserové svařování |
| a_f | [mm] | Přední a zadní délka svarové čočky |
| b | [mm] | Šířka svarové čočky |
| d | [mm] | Hloubka svarové čočky |

ÚVOD

Numerická simulace svařování je nástroj, který poskytuje uživateli široké spektrum možností, jak co nejdokonaleji napodobit reálný proces svařování. Tyto programy pracují na principu metody konečných prvků. Při modelování jednotlivých úloh je důležité mít přesná vstupní data. Nedodržení této věci má za následek velice odlišné výsledky při porovnávání reálného experimentu ze simulací. Výsledkem těchto simulací je komplexní náhled na daný svarový model a rozbor jednotlivých vlastností svarového spoje, jakož jsou struktura materiálu, tvrdost, plastická a konstrukční deformace, napětí konstrukce a teplotní pole. Tyto výsledky pomáhají uživateli predikovat kvalitu svarového spoje. V praxi tento nástroj zlevňuje proces vývoje, a to především tím, že zmenšuje počet experimentů.

Nevýhodou těchto simulačních nástrojů jako jsou Simufact Welding, Ansys, Sysweld jsou jejich pořizovací náklady a náročnost na hardwarové vybavení. Z toho vyplývá, že tyto simulační nástroje si mohou dovolit jen velké společnosti a pro malé jsou tyto nástroje zatím uzavřeny.

Svařování elektronovým paprskem je technologický proces, který umožňuje vytvářet svarové spoje vysoké kvality. V porovnání s ostatními konvenčními metodami svařování, je svařování elektronovým paprskem vysoce efektivní. Tato technologie se zprvu používala pouze v kosmickém průmyslu, kde se využívala ke svařování ušlechtilých materiálů, jako je například titan. Po uplynutí několika let došlo ke komercializaci a dnes se využívá v mnoha odvětvích průmyslu. Stále se jedná o technologii poměrně nákladnou, a proto je nutné myslet na ekonomiku věci. Při svařování experimentální sestavy byly vytvořeny tři desítky testů, než byl vytvořen požadovaný spoj. Tento proces by se za pomoci numerické simulace dal zkrátit, a to až trojnásobně. Pořád je ale nutné vytvořit reálný vzorek a při konfiguraci svařovacího procesu na něj brát zřetel. Zatím tato simulace nedokáže vytvořit zcela totožné podmínky, jako jsou při skutečném svařovacím procesu. Do budoucna, by ale reálné svařovací testy mohly být zcela odstraněny. Celý proces by byl propočítán v simulačním programu a po vytvoření požadovaného spoje by nastavení bylo exportováno do svařovacího zařízení, které by daný spoj v požadované kvalitě vytvořilo.

1 Vlastnosti svařovaného materiálu

Volba materiálu závisí na požadovaných vlastnostech svařence. Pro tento případ byla zvolena korozivzdorná, austenitická ocel značená dle AISI 316 L. Písmeno L v označení znamená méně, a to konkrétně uhlíku. Tato ocel má několik verzí, které nalezneme v tabulce 1. Tato ocel se využívá pro různé aplikace např. na chemické zásobníky, parovody, vyhřívací nádrže a rozvody kyselin.

Tabulka 1 – Přehled značení oceli

| Značení dle ČSN | Značení dle EN ISO | Značení dle AISI | Značení dle DIN |
|-----------------|--------------------|------------------|-----------------|
| 17346 | X5CrNiMo17-12-2 | 316 | 1.4401 |
| 17349 | X2CrNiMo17-12-2 | 316L | 1.4404 |
| 17341 | X6CrNiMo17-13 | 316H | 1.4919 |
| 17348 | X6CrNiMoTi17-12-2 | 316Ti | 1.4571 |

1.1 Chemické složení

Velký vliv na svařitelnost materiálu má chemické složení svařovaných součástí. V tomto případě se bude jednat o homogenní svarový spoj a svařování proběhne bez použití přídavného materiálu. Majoritním legujícím prvkem je zde chrom. Je to hlavní prvek, který vytváří korozivzdornost oceli. Aby byla ocel korozivzdorná je doporučený minimální obsah 12 %. Na druhou stranu tento prvek zapříčiňuje při tepelném zpracování tvorbu karbidů. Příklad molybdenu, který můžeme najít v chemickém složení dále zlepšuje korozivzdornost zejména důlkovou a šterbinovou korozi. Nevýhodou molybdenu je snížení řezné obrobiteľnosti.

Tabulka 2 – Chemické složení [4]

| Označení | C [%] | Cr [%] | Ni [%] | Mn [%] | Si [%] | S [%] | P [%] | Mo [%] |
|-------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| 316 | 0,08 | 16-18 | 10-14 | 2 | 0,75 | 0,03 | 0,045 | 2-3 |
| 316L | 0,03 | 16-18 | 10-14 | 2 | 0,75 | 0,03 | 0,045 | 2-3 |
| 316H | 0,01 | 16-18 | 10-14 | 2 | 0,75 | 0,03 | 0,045 | 2-3 |

Tabulka 3 – Přehled ekvivalentů

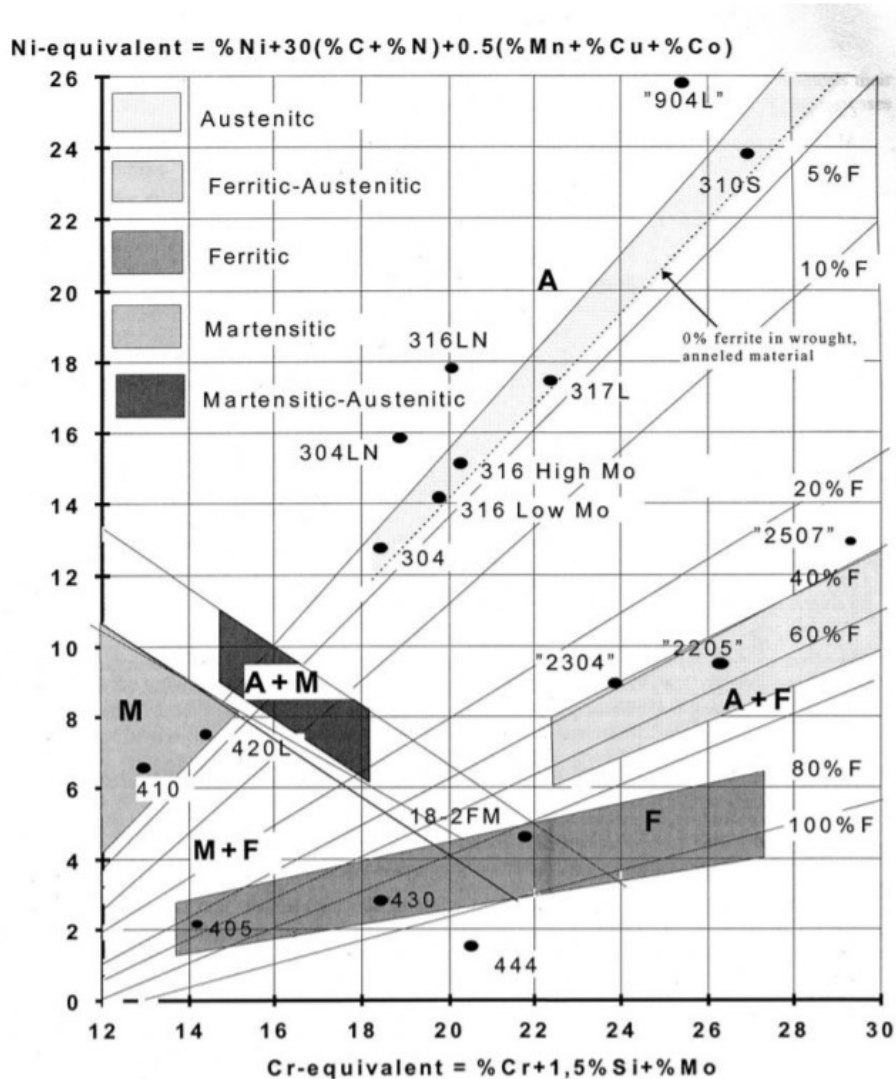
| | Fixní hodnota |
|---------------------------------------|----------------------|
| Uhlíkový ekvivalent (CEV) | 4,76 |
| Uhlíkový ekvivalent (CET) | 1,49 |
| Uhlíkový ekvivalent (PCM) | 1,26 |
| Niklový ekvivalent (Shaeffler) | 12,76 |
| Niklový ekvivalent (Delong) | 12,78 |
| Chromový ekvivalent | 19,16 |

1.2 Mechanické vlastnosti

Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti [4]

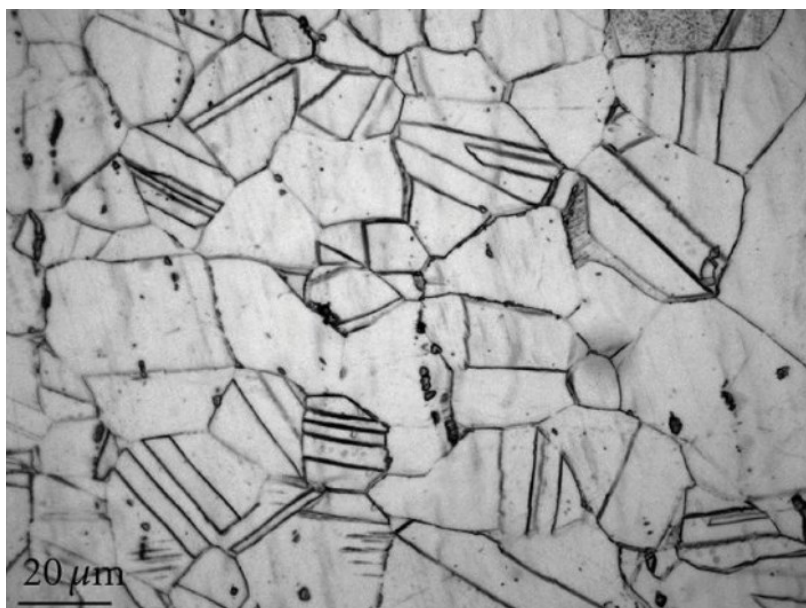
| | 316 | 316L | 316H |
|--|------------|-------------|-------------|
| Pevnost v tahu R_m [MPa] | 515 | 485 | 515 |
| Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] | 205 | 170 | 205 |
| Poměrné prodloužení A [% v 50 mm] | 40 | 40 | 40 |
| Tvrdost [HR-B] | 95 | 95 | 95 |
| Tvrdost [HB] | 217 | 217 | 217 |

Austenitická struktura zajišťuje výbornou houževnatost. Doporučuje se pro součásti, které jsou svařovány a nemůžou být následně žihány. Ocel 316L je nemagnetická v běžném stavu, při tepelném zpracování se stává mírně magnetická. Tato ocel je svařitelná všemi technologiemi s výjimkou kyslík acetylenového svařování. Obrázek 1 znázorňuje umístění oceli 316L v Shaefflerově diagramu. Ta se nachází v austenitu blízko k feritu, a to díky nízkému niklovému ekvivalentu.



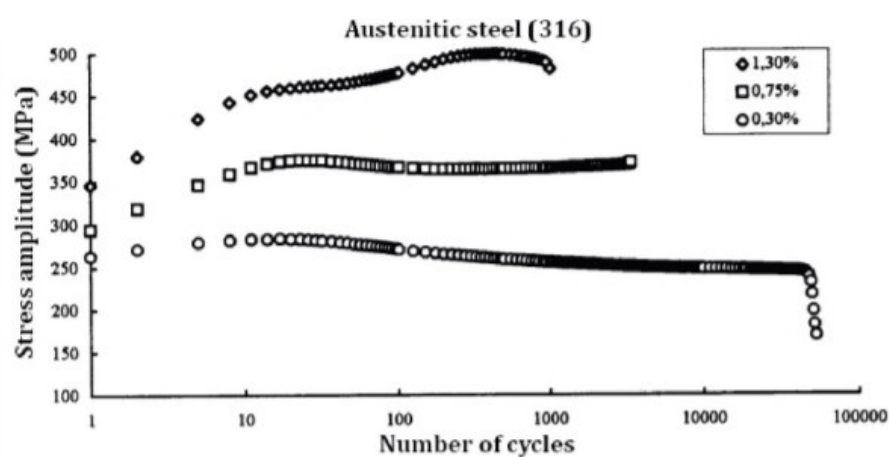
Obrázek 1 – Shaefflerův digram pro austenitické oceli [6]

Austenitické korozivzdorné oceli jsou náchylné k napětovému koroznímu praskání v halogenidovém prostředí. Ocel typu 316 L je poněkud odolnější vůči tomuto prostředí, než 18 Cr-8 Ni. Důvodem je molybden, který se v této oceli vyskytuje v obsahu 2-3 % [6]. Podmínky, které vytváří halogenidové prostředí jsou např. výskyt chloridu a zbytkové napětí. Na obrázku 2 je zobrazena mikrostruktura rovnoměrně napjaté části průřezu. Tento vzorek byl žihán a následně byla vytvořena mikrostruktura.



Obrázek 2 – Mikrostruktura oceli 316L [6]

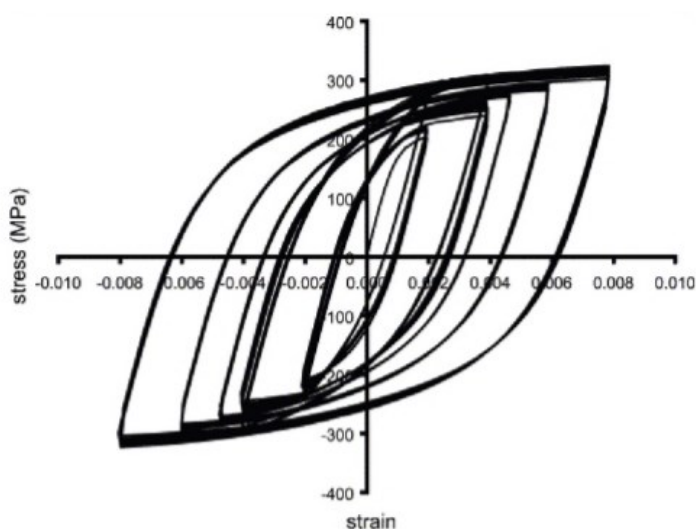
Další důležitou vlastností oceli 316 L je cyklické namáhání. Tato vlastnost se sleduje pomocí změny amplitudy napětí během cyklických funkcí. Často je tento proces rozdělen do dvou cyklických etap. Při první dochází k rychlé změně amplitudy napětí a fáze nasycení je konstantní. Při druhé etapě je cyklus opačný. Cyklické vytvrzování a změkčování austenitických ocelí je pozorováno při velkém počtu cyklů. Na začátku cyklického namáhání dochází ke zpevnění a na konci životnosti dochází k cyklickému změkčování.



Obrázek 3 – Cyklické namáhání oceli 316 [7]

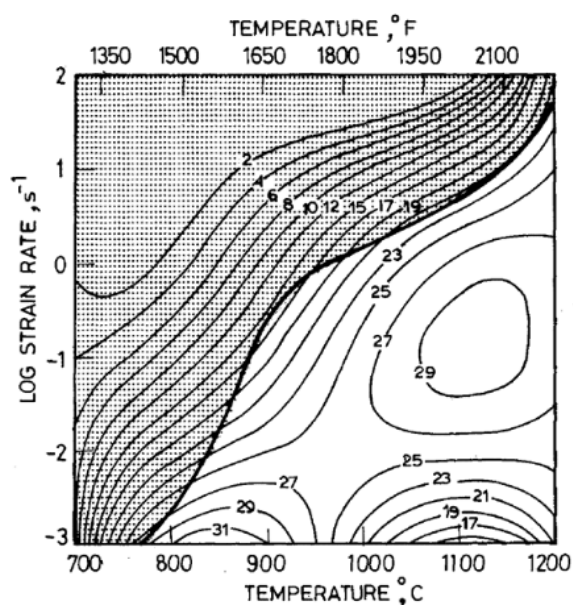
Stress amplitude – amplituda napětí, *Nuber of cycles* – počet cyklů, *Austenitic steel* – austenitická ocel

Hysterezní smyčka ukazuje vztah mezi napětím a zpevněním při různých počtech cyklů. Obrázek 4 ukazuje stabilní hysterezní smyčky nerezové oceli AISI 316L pod cyklickým zatížením na různé amplitudy napětí. Při stanoveném celkovém napětí amplituda 0,2 % [2], smyčka je téměř uzavřena. Pro větší amplitudy napětí se smyčky převážně otevírají. Kromě toho lze poznamenat, že s rostoucí amplitudou se napětí při nulovém zpevnění zvyšuje.



Obrázek 4 – Hysterezní smyčka oceli 316 [7]

Stress – napětí, Strain – zatížení



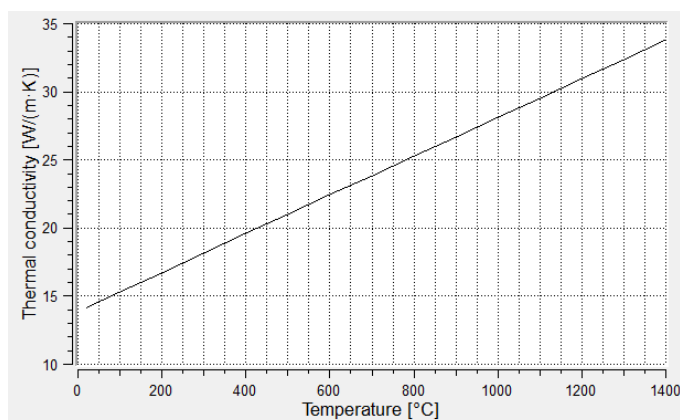
Obrázek 5 – Závislost teploty na tenzoru napětí

Temperature – teplota, Log strain rate – Logaritmický poměr

Tabulka 5 – Fyzikální vlastnosti

| | 316, 316L, 316H |
|--|------------------------|
| Hustota [Kg.m⁻³] | 7998 |
| Modul pružnosti [GPa] | 193 |
| Součinitel tepelné roztažnosti 0-100 ° C [10⁻⁶ K] | 15,9 |
| Součinitel tepelné roztažnosti 0-315 ° C [10⁻⁶ K] | 16,2 |
| Součinitel tepelné roztažnosti 0-538 ° C [10⁻⁶ K] | 17,5 |
| Tepelná vodivost 0-100 ° C [W.m.⁻¹K⁻¹] | 16,3 |
| Tepelná vodivost 0-500 ° C [W.m.⁻¹K⁻¹] | 21,5 |
| Charakteristické teplo 0-100 ° C [J.kg.⁻¹K⁻¹] | 500 |
| Teplota solidu [° C] | 1280 |
| Teplota likvidu [° C] | 1450 |

Fyzikální vlastnosti materiálu jako jsou součinitel tepelné roztažnosti, tepelná vodivost a charakteristické teplo jsou velice důležité při tvorbě svarového spoje. Pro porovnání tepelná vodivost oceli 316 L je při 400 ° C 20,2 W.m.⁻¹K⁻¹ a pro ocel S235 je při 400 ° C 43,2 W.m.⁻¹K⁻¹. Tento fakt má za následek, že při svařování oceli 316 L bude teplo špatně rozváděno po materiálu v místě ohřevu může dojít k vnitřnímu pnutí a ke tvorbě karbidů.



Obrázek 6 - Tepelná vodivost oceli 316L

Thermal conductivity – tepelná vodivost, temperature – teplota

2 Svařování elektronovým paprskem

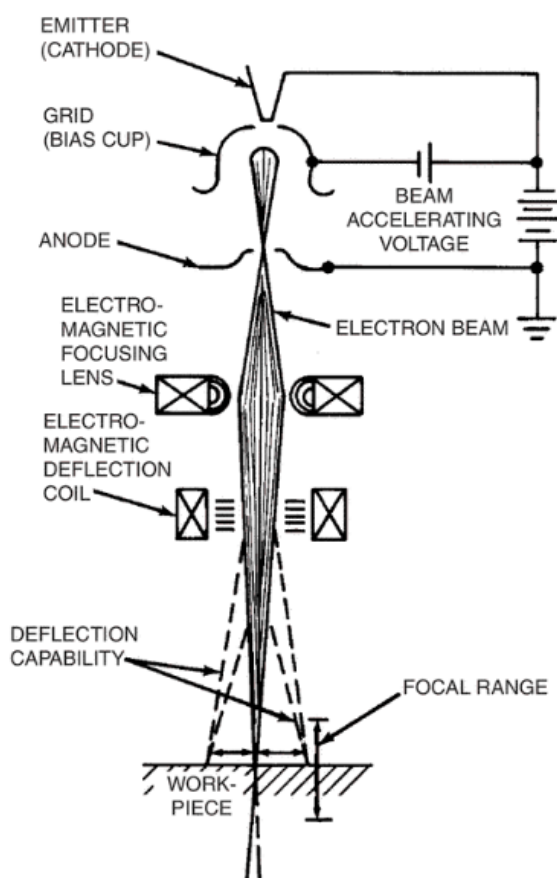
Svařování elektronovým paprskem (EBW) je svařovací proces, u kterého dochází ke svaření materiálu koncentrovaným paprskem. Tento paprsek se skládá z elektronů, které velkou rychlostí zasahují svarový spoj. Vlivem toho se jejich kinetická energie mění na tepelnou, a tím dochází k vytvoření svarové lázně. Proces se používá bez ochranného plynu, až na některé aplikace, které probíhají bez vakua a bez tlaku. Tato metoda se dělí na vysoko vakuové svařování elektronovým paprskem (EBW-HV), středo vakuové svařování elektronovým paprskem (EBW-MV) a bez vakuové svařování elektronovým paprskem (EBW – NV). V některých literaturách je poslední metoda označována jako atmosférické svařování elektronovým paprskem, a to díky tomu, že při svařování bez vakua se tlak v pracovním prostoru blíží k atmosférickému.

Na začátku aplikace, byl proces svařování elektronovým paprskem omezen na provoz zcela v podmínkách vysokého vakua. O pár let později bylo vyvinuto zařízení, které nevyžadovalo použití vakua v celé pracovní komoře, ale pouze v části, kde se generuje paprsek. To mělo za důsledek zlevnění celé technologie a zavedení do dalších odvětví průmyslu.

Ke komerčnímu využití této svařovací technologie došlo v padesátých letech minulého století. Pro mnoho výhod byl tento proces hned využíván ve výrobě. Nejprve pro výrobu jaderných zařízení a krátce potom pro kosmický a letecký průmysl. Ve všech těchto odvětvích bylo potřeba zlepšit kvalitu a spolehlivost svarových spojů, a to tato technologie plně splňovala. Další předností této technologie je možnost svařovat materiály odlišných tloušťek v rozmezí do 250 mm [8]. Další výhodou je velice malá tepelně ovlivněná oblast, což vede k nízkému zbytkovému napětí a malé deformaci svařence. Materiál jako titan, který je vysoce reaktivní je svařen bez rizika oxidace. Svařovací proces je vysoce produktivní, a to i včetně času, který je potřeba k vytvoření vakua ve svařovací komoře. Je velice dobře opakovatelný, díky jeho automatizaci. Nevýhodou této technologie jsou vysoké pořizovací náklady, vysoké požadavky na obsluhu a omezení velikosti svařence velikostí pracovní komory.

2.1 Základní princip

Svařování elektronovým paprskem vytváří svarový spoj pomocí tepla, které se uvolňuje při dopadu vysokoenergetických elektronů na základní materiál. Elektrony jsou základní částice hmoty. Jejich hlavní charakteristikou je záporně nabitý náboj a velmi malá hmotnost. Při svařování jsou tyto částice zrychleny na rozmezí mezi 30 % a 70 % [3] rychlosti světla. Částice dopadají na základní materiál a v místě dopadu vzniká lokální teplo a tavení svarového spoje. Paprsek elektronů je vytvořen v elektronové pistolí, která obsahuje elektronový vysílač, elektrickou předpět'ovou řídicí jednotku a anodu. Elektronový vysílač se označuje jako katoda. Doplňková zařízení jakož jsou zaostřovací a vychylovací cívký jsou určeny pro zaostření a odklonění paprsku.

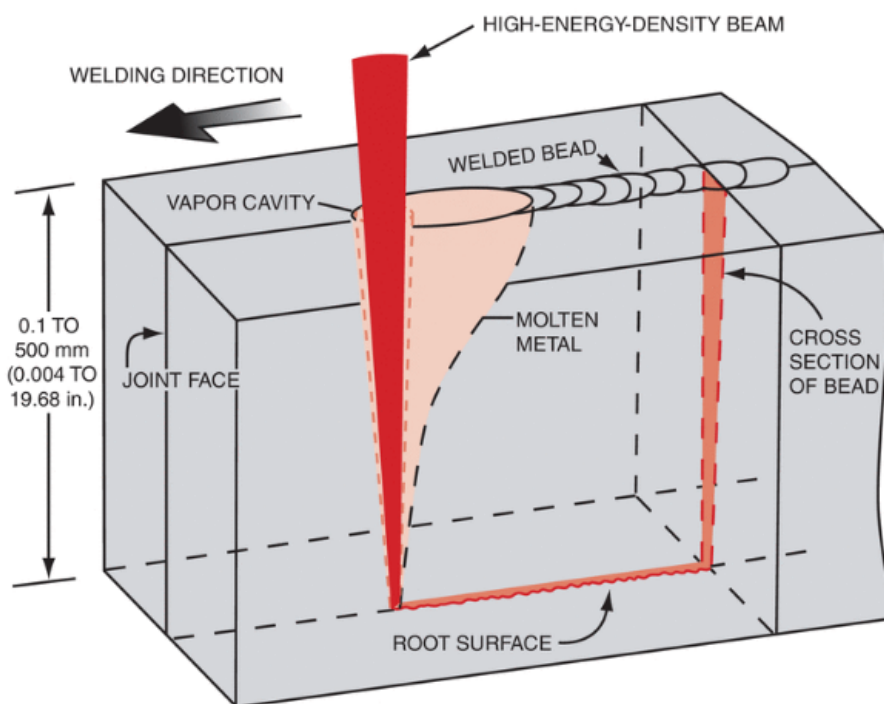


Obrázek 7 - Schéma zařízení pro tvorbu elektronového paprsku [3]

Emitter – vysílač, Grid – mřížka, Anode – anoda, Electromagnetic focusing lens – elektromagnetické zaostřovací čočky, Electromagnetic deflection coil – elektromagnetická vychylovací cívka, Deflection capability – vychylovací rozpětí, Work piece – pracovní prostor, Beam accelerating voltage – urychlovač napětí paprsku, Electron beam – elektronový paprsek, Focal range – ohnisková vzdálenost

2.2 Princip procesu

Hlavní částí procesu svařování elektronovým paprskem je sestava pistole. Zjednodušená ukázka sloupce elektronového paprsku je znázorněna na obrázku 7.



Obrázek 8 - Princip svařování EBW [1]

Welding direction – směr svařování, high energy density beam – vysoko energetický paprsek, vapor cavity – výparová kavita, welded bead – svarová kapka, molten metal – roztavený kov, root surface – převíšení kořene, joint face – průřez spoje, cross section of bead – přechodná část svarové kapky

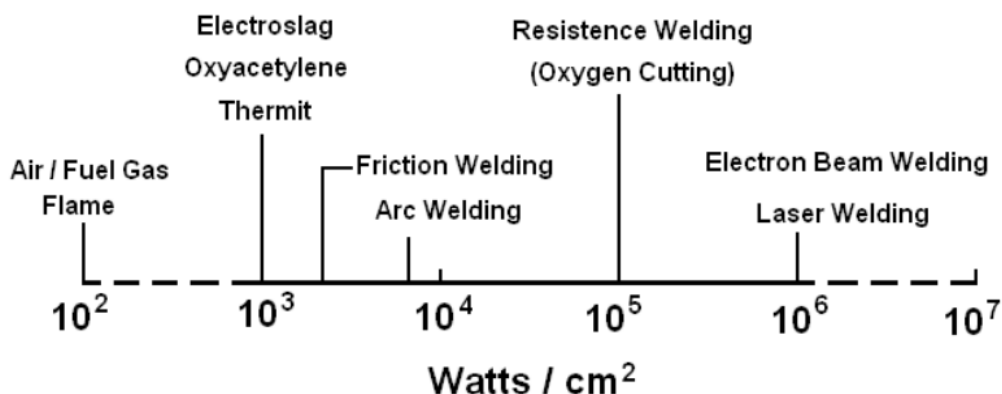
Elektrony jsou generovány zahříváním záporně nabitého vysílače na emisní teplotu, to způsobí, že elektrony jsou vypuštěny ke kladně nabitě anodě. Dále jsou posílány do přesně nakonfigurované mřížky, která je urychluje a tvaruje do paprsku. Ven z pistole paprsek vychází přes rozptylovou cívkou, kterou můžeme nastavit velikost pole paprsku při dopadu na materiál. Rozlišujeme dva typy pistolí diodové a triodové. V diodové mají elektroda a vysílač stejný potenciál a spolu se nazývají katodou. V triodové pistolí mají elektroda pro tvarování paprsků a vysílač různé potenciály. To umožňuje nastavit na mřížce více záporné hodnoty, než na vysílači a řídit tak tok paprsku. V tomto případě se vysílač nazývá katoda.

V obou případech je anoda součástí pistole a generování paprsku zcela nezávislé na základním materiálu.

Paprsek dosahuje rychlosti v rozsahu 30 % až 70 %x [3] rychlosti světla, při napětí v rozsahu 25 (kV) až 200 kV [3]. Paprsek pak pokračuje směrem k obrobku. Jakmile paprsek vystoupí z pistole, postupně se rozšiřuje, jak je znázorněno na obrázku 8. Tato divergence je výsledkem skutečnosti, že všechny elektrony v paprsku mají určité množství radiální rychlosti v důsledku své tepelné energie, a navíc všechny prožívají určitý stupeň vzájemného elektrického odpuzování. Zatímco elektrony s mnohem vyšší hladinou energie nabíjí částice, což způsobuje samo-zaostřovací efekt, nižší hladina energie používaná ve svařovacích aplikacích nezpůsobují tento jev. Proto, aby se působilo proti tomuto přirozenému divergenčnímu efektu, se používá elektromagnetický systém čoček ke sblížení svazku a zaostření na malé místo na obrobku. Divergence a úhly konvergence paprsku jsou relativně malé, což dává koncentrovanému paprsku použitelný ohniskový rozsah, který se rozprostírá na vzdálenost přibližně 25 mm [8]. V praxi je rychlost přivádění energie do svarového spoje řízena čtyřmi základními proměnnými.

1. Proud paprsku – počet elektronů za sekundu dopad na obrobek
2. Zrychlení napětí paprsku – rychlost těchto elektronů
3. Velikost bodu ohniska paprsku – stupeň koncentrace paprsku
4. Rychlost pohybu svařence

Pro tvar a rozměry svarů je rozhodující způsob ohřevu svařence, který závisí na tepelném zdroji. Obrázek 9 porovnává množství přivedeného tepla na jednotku vzdálenosti. Elektronový paprsek představuje tepelný zdroj s vysokou hustotou a velice úzkou svarovou oblastí, proto je svařování touto technologií doprovázeno velice nízkou hodnotou deformace obrobku. Deformace je velice nízká ve srovnání s technologiemi TIG, MIG a plazmovým svařováním. Množství tepla potřebné pro vytvoření svarového spoje a tepelné ztráty s procesem spojené definují celkové množství tepla, které musí zdroj vygenerovat. Pokud jde o tepelné ztráty, elektronový paprsek je velice výhodný. Účinnost této technologie se pohybuje mezi 0,7 a 0,8 [3] v jiných literaturách uvádí 0,85 [9].

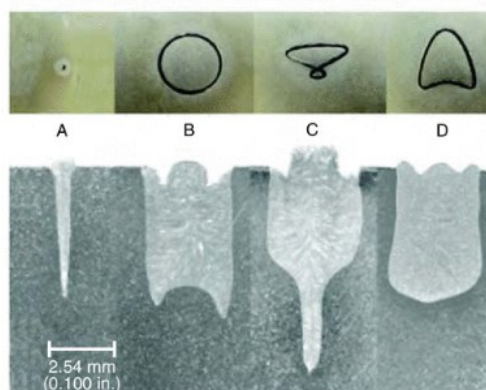


Obrázek 9– Velikost TOO pro jednotlivé technologie svařování [9]

Fuel gas flame – plamenové svařování, electroslag – elektrostruskové svařování, thermit – svařování termitem, friction welding – třecí svařování, arc welding – obloukové svařování, resistance welding – odporové svařování, oxygen cutting – kyslíkové řezání, electron beam welding – elektronové svařování, laser welding – laserové svařování

2.3 Vychylování paprsku

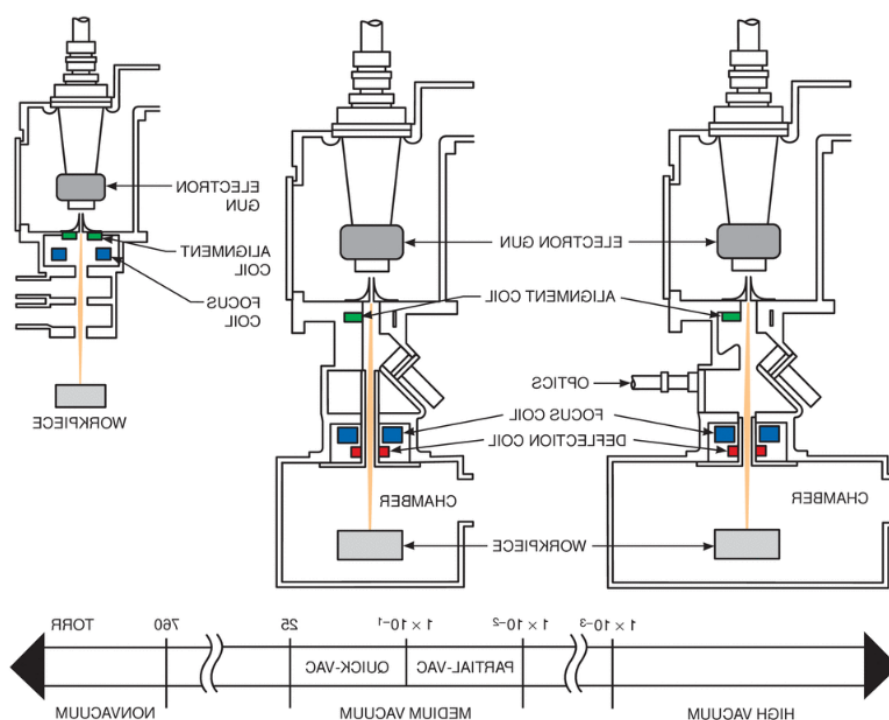
Elektronový paprsek může být při pohybu snadno vychýlen. To umožňuje vytvoření specifické dráhy paprsku například kruhy, elipsy, rastry nebo parabolické tvary, které mají být vytvořeny na povrchu svařence. Vychýlení paprsku zajišťuje elektronický generátor vzoru, který řídí magnetický systém vychylovací cívky. Několik různých vzorů drah, které se vyskytují jsou znázorněny na obrázku 10. Průhyb modifikuje průměrnou hodnotu hustoty výkonu do svarového spoje a výsledkem je změna vlastností svaru. Důležité je, že úpravy musí být prováděny vždy opatrně při použití jakéhokoli typu průhybu paprsku, aby bylo zajištěno, že úhel dopadu paprsku nepříznivě neovlivňuje konečné výsledky svařování.



Obrázek 10– Způsoby vychýlení paprsku [3]

2.4 Druhy procesu

Obvykle se používají tři základní způsoby svařování elektronovým paprskem, a to vysoko vakuové (EBW-HV), středo vakuové (EBW-MV) a bez vakuové (EBW-NV). Hlavní rozdíl mezi těmito metodami je tlak v pracovní komoře. Vysoko vakuová metoda používá v pracovní komoře tlak 1×10^{-3} [8] Pa a nižší, v některé literatuře se můžeme také setkat s označením tvrdé vakuové svařování. Pro středně-vakuové svařování se rozsah tlaku pohybuje od 1×10^{-2} [9] až do 1×10^{-1} [9]. Vysoko vakuové a středo vakuové svařování je prováděno ve vakuové komoře. Středo vakuová metoda si zachovává většiny výhod vysoko vakuové. Další výhodou je výrazně kratší čas vakuování pracovní komory. Výsledkem je vyšší výrobní rychlost. U bez vakuové metody odpadá čas na vytvoření vakua, ale není vhodná pro všechny aplikace, protože obecně jsou svary širší a mělčí než svary vyrobené ve vakuu. Další nevýhodou je, že svarová lázeň může integrovat s atmosférou. Tomu se dá zabránit pomocí ochranné atmosféry inertního plynu.



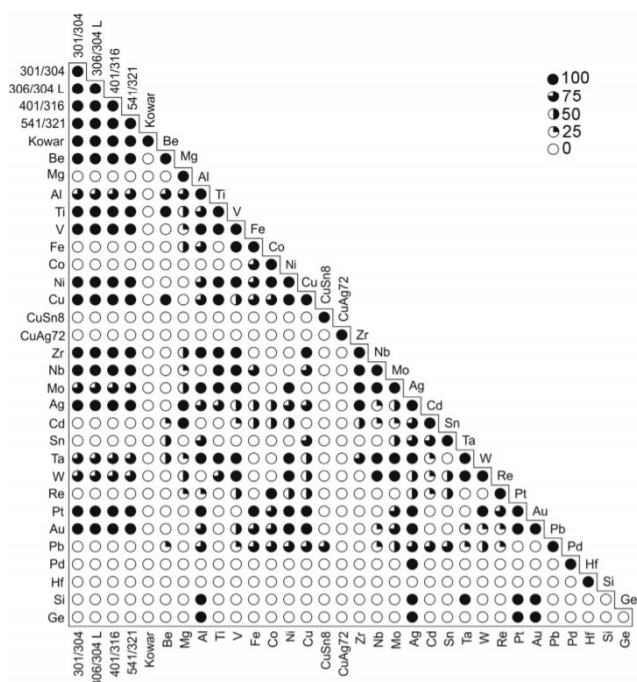
Obrázek 11 – Typy zařízení EBW [3]

Electron gun – elektronové dělo, alignment coil – vyrovnávací síťka, optics – optika, focus coil – zvětšovací cívk, deflection coil – vychylovací cívk, workpiece – pracovní plocha, chamber – komora, High vacuum – vysoké vakuum, Medium vacuum – střední vakuum, nonvacuum – bez vakua

Při středo vakuovém provozu se paprsek generuje ve vysokém vakuu a pak se promítá do svařovací komory, která pracuje při vyšším tlaku. Toho je dosaženo pod výstupní trubicí elektronového paprsku konstruovanou tak, aby byl umožněn průchod paprsku a zároveň nedošlo ke zpětné difuzi plynů z pracovní komory do trubice. Bez vakuové svařovací zařízení pracuje na podobném principu. Elektronový paprsek je vytvořen ve vysokém vakuu a následně je pomocí speciálních oddělovacích otvorů doveden do pracovní komory, kde svařuje za atmosférického tlaku nebo hodnot jemu blízkých. Na Obrázku 11 jsou znázorněna schémata jednotlivých zařízení.

2.5 Svařitelnost

Svařování elektronovým paprskem je technologie, která má širokou škálu použití například se dají vytvářet heterogenní spoje. Další možností je spojovat žáruvzdorné kovy např. wolfram, molybden a kovy chemicky aktivní jakož jsou titan, zirkonium a beryllium. Dále je možné tvořit tzv. černo bílé spoje. Obrázek 12 ukazuje kombinace materiálů, které lze svazkem elektronů svařit. Příkladem heterogenních spojů může být spojení hliníku a oceli. Při vytváření tohoto spoje vznikají intermetalické fáze, které jsou závislé na poměru míchání. Vysoká dynamika elektronového svařování zajišťuje, že tyto fáze budou rozptýleny v celé svarové lázni.



Obrázek 12– Možnosti svařitelnosti materiálů technologií EBW [3]

2.6 Výhody procesu

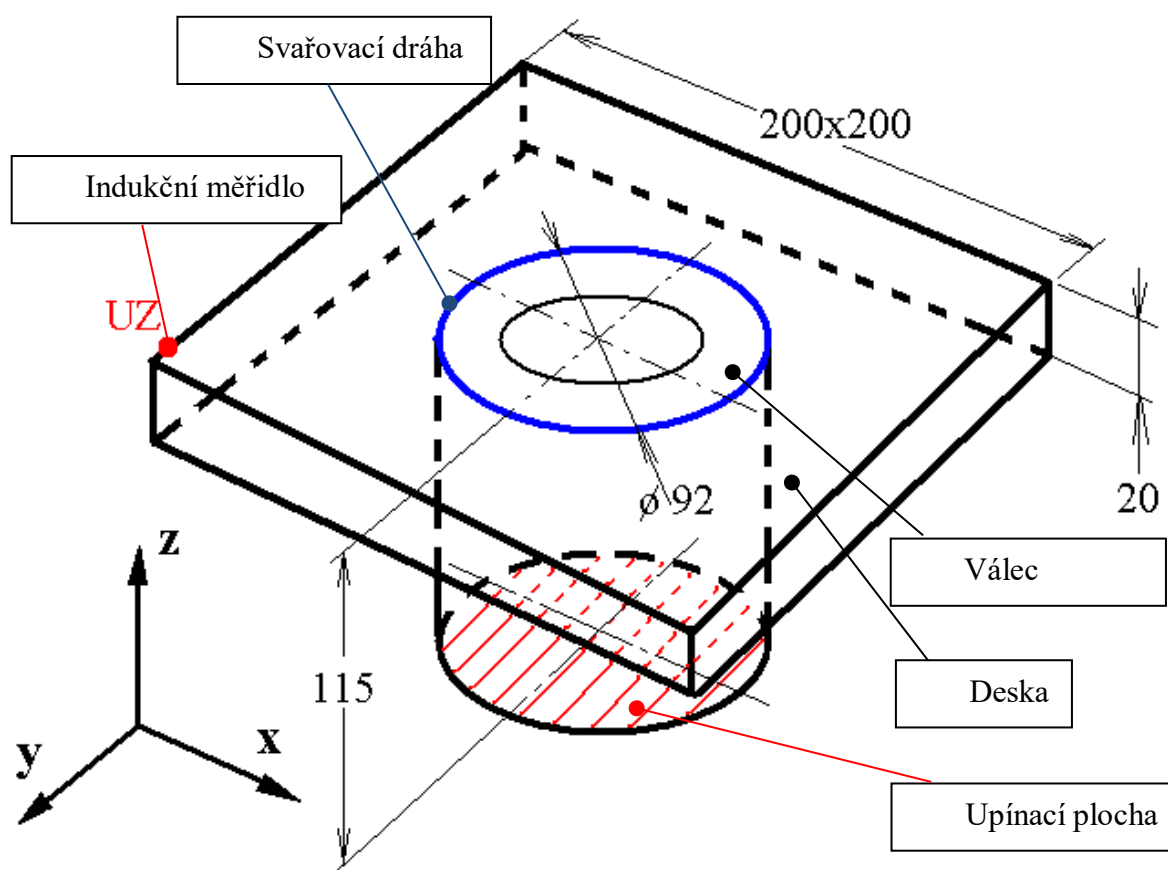
Elektronový paprsek je technologie, která nabízí široké množství výhod. Jednou z nich je svařovací výkon zdroje. Mohou být provedeny jednopřechodové svary velkých tloušťek, a to díky tepelnému příkonu. Výsledkem je velice úzká tepelně ovlivněná oblast, nízká hodnota deformací. Díky vakuu také nedochází k difundování dusíku a kyslíku do svarového spoje. Tupé spoje jsou prováděny bez přídavného materiálu u všech tloušťek. Díky vakuu a svazku elektronů je možné svařovat v různých vzdálenostech od svařence.

2.7 Svařování reálného vzorku technologií EBW

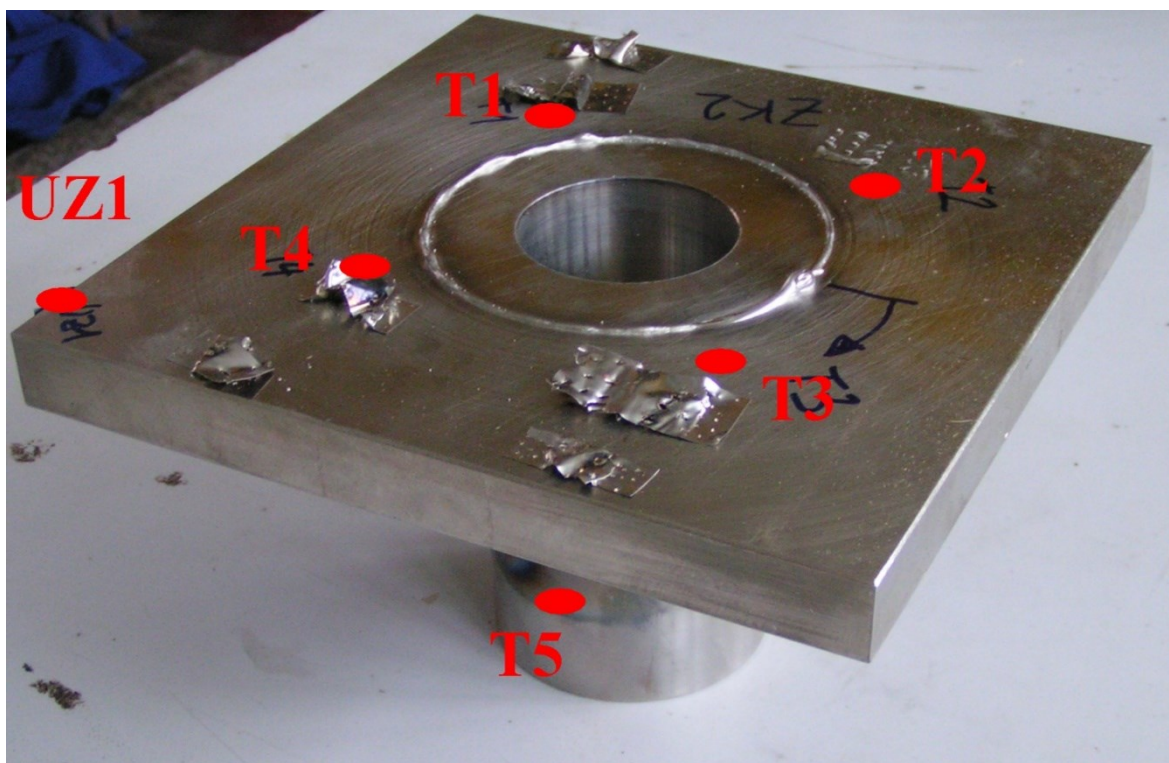
Reálné vzorky byly vytvořeny proto, aby je bylo možné porovnat s numerickou simulací s cílem snížit počet svařovacích testů. Jednotlivé komponenty jsou vyrobeny z oceli 316L. Deska je 200 mm dlouhá, 200 mm široká, 20 mm tlustá a uprostřed je vyvrtaná díra o průměru 92 mm. Válec má velký průměr o velikosti 92 mm, malý průměr 52 mm a vysoký je 115 mm. Rozměr díry v desce a velkého průměru válce byly vyrobeny s přesahem, z důvodu nalisování válce do desky. Tímto krokem odpadla nutnost ustavování desky na válcí, protože lisovaný spoj odebral všechny stupně volnosti. Celá sestava svařence byla následně upevněna na pohyblivém stole svařovacího zařízení za upínací plochu zobrazenou na obrázku 13. Pohyblivý stůl byl vložen do pracovní komory, po uzavření komory bylo vytvořeno vakuum a proběhl proces svařování. Před svařováním byly zvoleny tabulkové svařovací parametry, které byly v průběhu zkoušek modifikovány. Výsledné svařovací parametry se nachází v tabulce 6. Celkem bylo provedeno 33 zkoušek. Měření teplotního pole bylo provedeno pomocí termočlánků zobrazených na obrázku 14, kde je vidět i jejich rozmístění. Dále bylo měřena vzdálenost posunu pomocí indukčního měřidla, které bylo umístěno v poloze označené na obrázku 13 jako UZ.

Tabulka 6 – Výsledné svařovací parametry

| | |
|--|--------|
| Počet průchodů svaru [-] | 1 |
| Svařovací napětí [kV] | 60 |
| Svařovací proud [mA] | 203 |
| Zaostřovací proud [A] | 2,41 |
| Zaostřovací vzdálenost [mm] | 183 |
| Výkon elektrického oblouku [kW] | 12,375 |
| Svařovací rychlost [mm.s ⁻¹] | 25 |



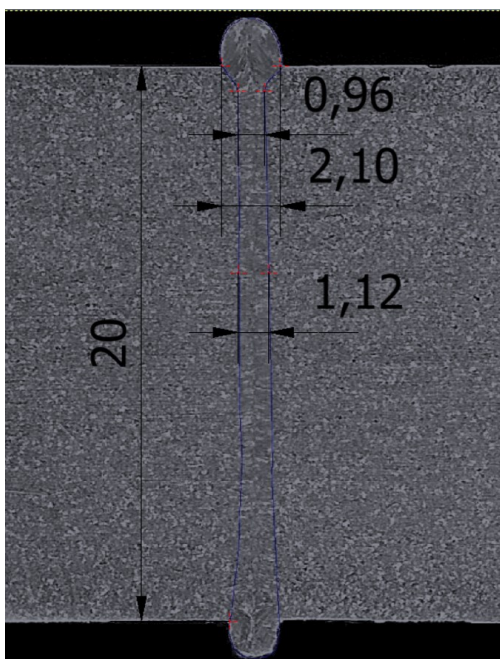
Obrázek 13– Sestava svařovaných součástí



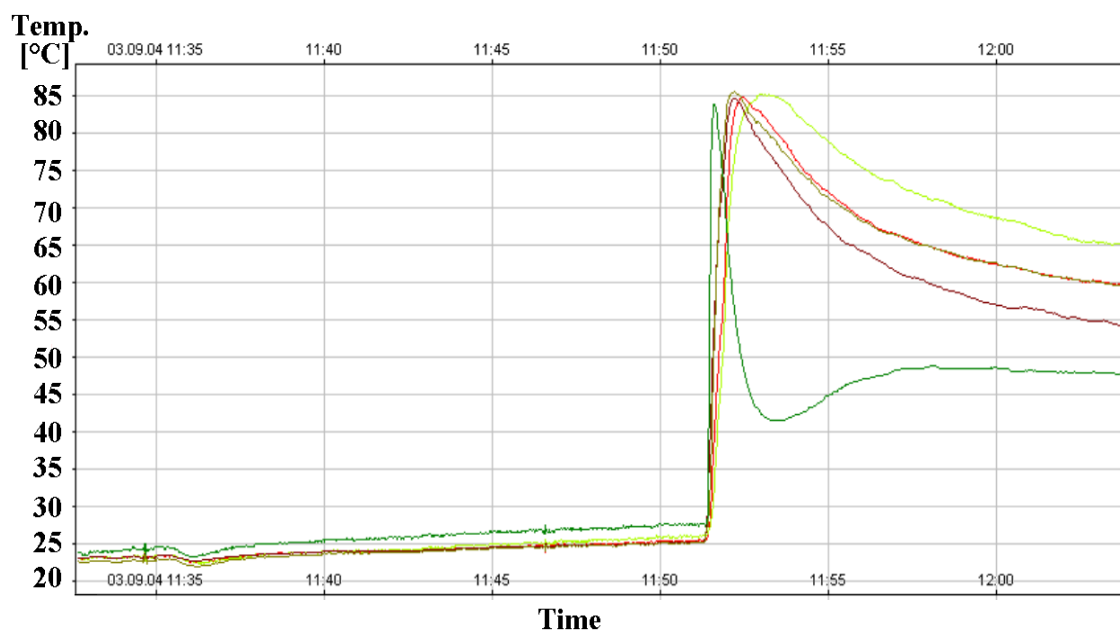
Obrázek 14 – Ukázka rozmístění termočlánků

Na zkušebním vzorku byla provedena metalografická zkouška. Jejím výsledkem je o makrostruktura zobrazená na obrázku 15. Velice úzká tepelně ovlivněná oblast je typická pro svařování elektronovým paprskem. Naměřené hodnoty TOO budou následně porovnány s výsledky ze simulace. Dalším výsledkem jsou hodnoty teplotních cyklů naměřené na termočláncích, které se nacházejí na obrázku 16.

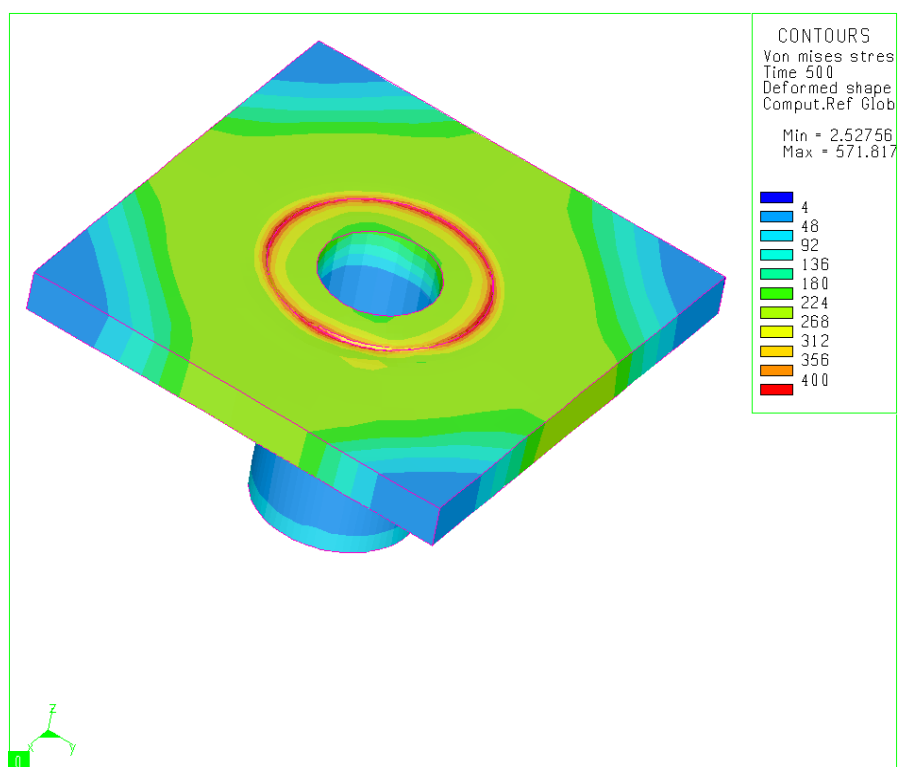
Numerická simulace procesu byla provedena také institutem, který prováděl samotný svařovací proces a zkoušky. Nebyly však porovnány TOO a termočlánky s reálnými výsledky. Jediná data, která byla poskytnuta z numerické simulace je obrázek 17 na kterém je analýza zbytkového napětí a obrázek 18, kde je vertikální zkreslení. Oba tyto výsledky byli měřeny na konci svařovacího procesu. U analýzy zbytkového napětí byla naměřena maximální hodnota 571,8 MPa a minimální 2,52 MPa. Hodnota maxima vertikálního zkroucení byla naměřena 0,2 mm a minima 0,04 mm.



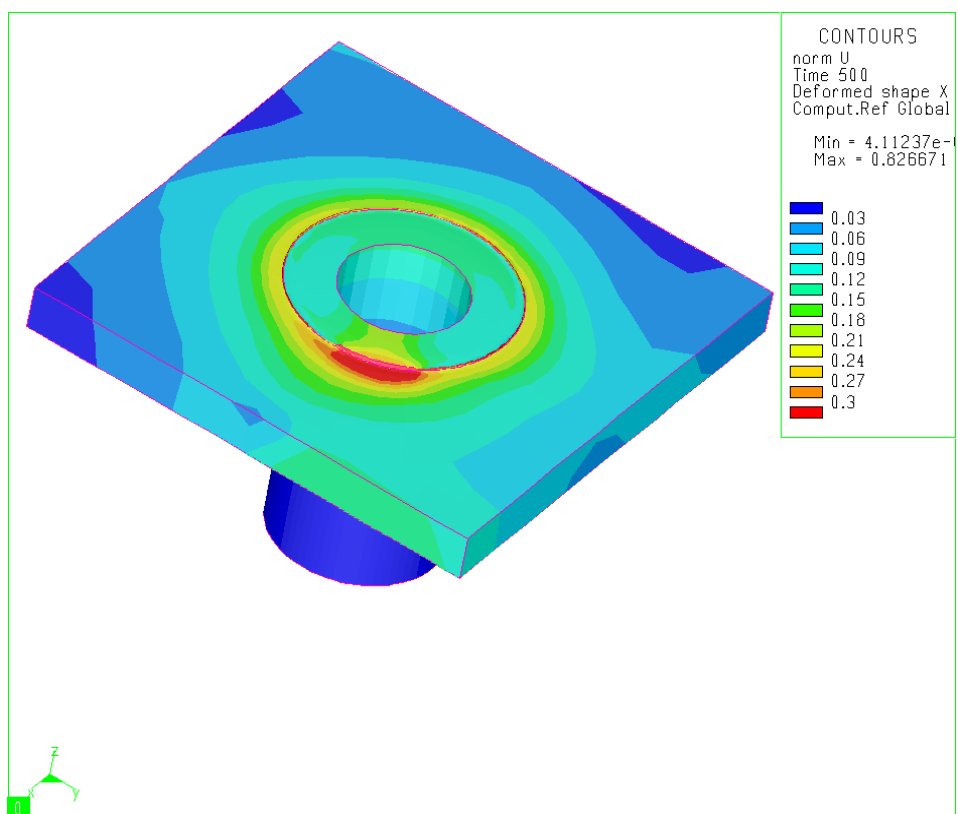
Obrázek 15 – Makrostruktura svařovaných součástí



Obrázek 16 - Teplotní cyklus reálného svařování



Obrázek 17 - Analýza zbytkového napětí



Obrázek 18 – Analýza vertikálního zkroucení

3 Numerická simulace

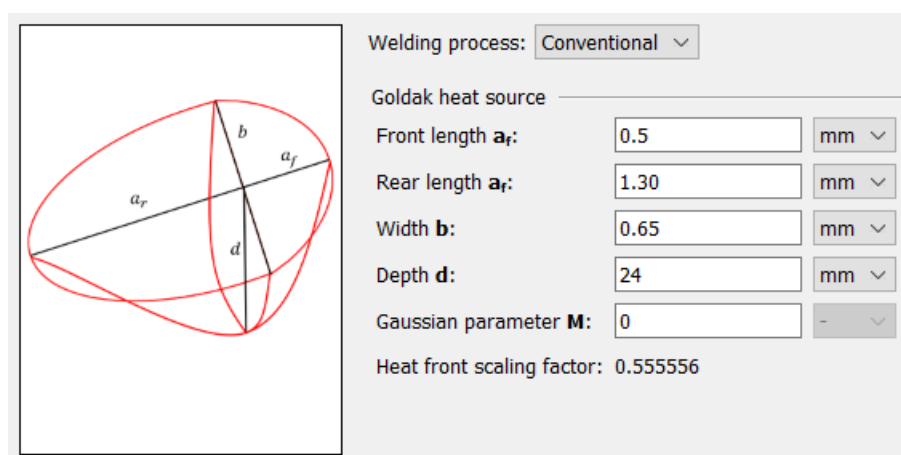
S rostoucími požadavky na rychlost, kvalitu a efektivitu výroby je nutné používat simulační programy, které jsou schopny predikovat vlastnosti výsledného zařízení. Tyto programy se využívají od stavebnictví, letectví, kosmonautiku až po průmysl. Pro společnosti, které využívají svařovací technologie existuje řada programů pro numerickou simulaci svařování. Mezi nejpoužívanější patří Simufact, Sysweld a Visualweld. Využívání svařovacích technologií sebou nese velkou řadu nevýhod. Například tepelné ovlivnění svařovaných součástí a jejich deformace. Další nevýhodou mohou být vady svaru, a to od přípustných až po nepřípustné. Za využití numerických simulací je možné vytvořit kompletní analýzu svařového spoje. Od vzniku tepelně ovlivněné oblasti, přes změnu materiálové struktury v (TOO), až po výslednou tvrdost svaru a v jeho oblasti. Pro simulaci svařování elektronovým paprskem byl použit Simufact welding 8.0.

3.1 Simufact welding 8.0

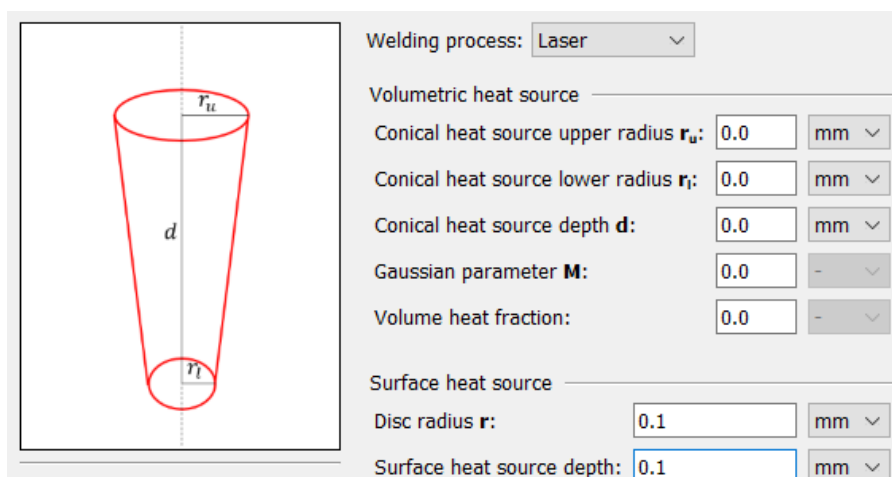
Tento nástroj pro numerickou simulaci je jedním z nejmodernějších nástrojů pro numerickou simulaci svářecích procesů. K řešení využívá metodu konečných prvků (FEM). Tato metoda rozdělí spojitý celek na konečný počet prvků, u kterých je pak možné modelovat chování materiálu. Ve verzi 8.0 bylo přidáno několik vylepšení. Jednou z nich je síťování, které bylo dříve nutno vytvořit v jiném programu. To nebylo moc sofistikované, jelikož pro tvorbu svařovacího procesu bylo zapotřebí minimálně tří programů. Jeden na vytvoření 3D modelu např. Autodesk Inventor. V dalším programu např. Simufact forming byly modely na síťovány a až poté exportovány do programu Simufact welding, kde mohl být vytvářen svařovací proces. Proto vývojáři implementovali nástroj síťování přímo do samotného programu Simufact welding.

Pro dosažení přesných výsledků analýzy je zapotřebí přesných vstupních dat, ze kterých je proces vytvořen. Mezi vstupní data patří 3d modely jednotlivých svařovacích součástí, jejich materiál, svařovací dráha a zdroj tepla to jsou ty nejdůležitější. Program simufact disponuje knihovnou materiálů. Zde je možné najít okolo sedmi set materiálů. Důležité však je porovnat vlastnosti materiálu v knihovně a materiálu, který byl použit při reálném pokusu. Tyto data se mohou výrazně lišit, a při následném výpočtu by mohlo dojít k velkému zkreslení výsledku, proto je nutné některé parametry předefinovat podle vlastností skutečného materiálu.

Důležitým parametrem pro vznik svarové lázně je zdroj tepla. V program Simufact je možné použít více variant nastavení teplotního zdroje. V první řadě si je zde možné vybrat mezi Goldakovým zdrojem tepla zobrazeném na obrázku 19 a zdrojem tepla který charakterizuje komolý kužel na obrázku 20. Goldakův model se využívá pro základní svařovací technologie např. metoda 131, 135 a 141 (označení ISO 4063). Komolý kužel se uplatňuje u metod 51 a 52.



Obrázek 19 – Goldakův dvojitý elipsoid



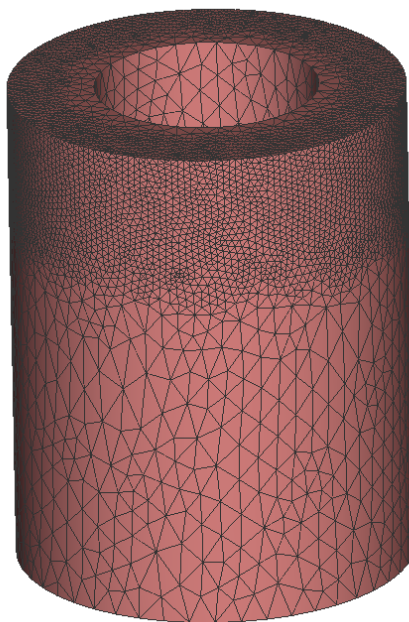
Obrázek 20 – Komolý kužel

3.2 Vstupní parametry pro tvorbu procesu

Pro svařování elektronovým paprskem byl v programu Simufact zvolen proces laserového svařování, a to z důvodu, že při procesu elektronového svařování docházelo k častým pádům programu. Po důkladném studování bylo zjištěno, že tyto procesy se metodikou výpočtu nijak neliší, a proto může být laser použit pro výpočet. Jediný rozdíl, v programu se nachází v nastavení vakuové komory. Výpočet byl bez tohoto kroku. Po importování 3d modelů jednotlivých součástí, které byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2018 následuje jejich síťování.

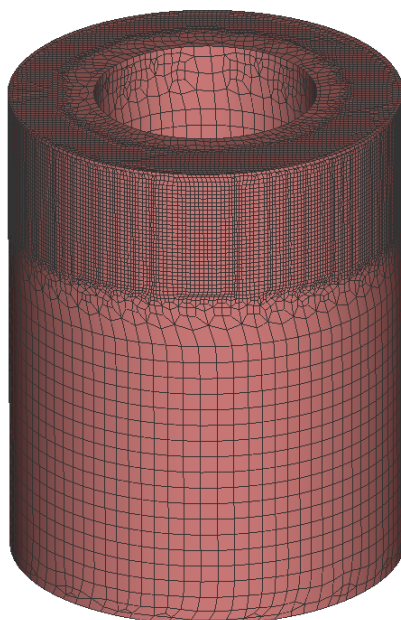
Síťování

Při simulaci byly testovány více variant řešení. Jednou z možností bylo nastavení síťování. Na obrázku 21 byl použit typ síťování Tetmesh a typ prvku Tetrahedral (134). Tento typ používá jako nejmenší prvek tříboký jehlan. V horní části válce je patrné zjemnění. To je vytvořeno, pro svár a jeho okolí. Válec by mohl být na síťován jemně celý, ale to by prodloužilo výpočet, a to je nežádoucí. Velikost hrany jehlanu byla nastavena na 6 mm a stupeň zjemnění byl nastaven na hodnotu 1. Při tomto nastavení se válec skládá z 36170 prvků.



Obrázek 21 – Válec (Typ síťování – Tetmesh, typ prvku – Tetrahedral (134))

Druhou možností nastavení bylo použití síťování Hexmesh a typ prvku Hexahedral. Tento typ využívá jako nejmenší element kvádr. Stupeň zjemnění byl použit stejný, ale délka hrany měla hodnotu 4 mm. Při této konfiguraci se válec skládá z 39452 prvků.



Obrázek 22 – Válec (Typ síťování – Hexmesh, typ prvku – Hexahedral)

Nastavení materiálu

Při svařovacím procesu byl použit materiál 316L-sw. Tento typ byl importován z knihovny samotného programu. Následně byl editován, aby jeho vlastnosti byly co nejpodobnější s reálným materiálem. Podrobný popis materiálu se nachází v kapitole 1 Vlastnosti svařovaného materiálu.

Konfigurace tepelného zdroje

Při tvorbě procesu bylo vytvořeno okolo dvaceti tepelných zdrojů. V tabulce 7 jsou zobrazeny parametry dvou z nich. Při použití těchto konfigurací tepelného zdroje se výsledek analýzy nejvíce podobal reálnému procesu. Rychlost svařování byla pro obě nastavení totožná a to 25 mm.s^{-1} . Ve zdroji byl použit přechodný přímý režim, u kterého se zadává

hodnota elektrického výkonu svařovacího zdroje. Dále je zde možnost nastavit přesný průběh začátku a konce svařovacího procesu. V praxi to znamená, že lze na začátku procesu do svarové lázně vnést více tepla, aby došlo k protavení a následně ho snížit na požadovanou mez. Nastavení je provedeno tak, že je použit poměr ze svařovacího výkonu a doba průběhu. Oba procesy, které jsou zobrazeny v tabulce 7 využívají Goldakův zdroj tepla. U několika procesů byl nastaven jako zdroj tepla komolý kužel, ale výsledky byly nedostatečné.

Tabulka 7 – Nastavení svařovacích zdrojů tepla

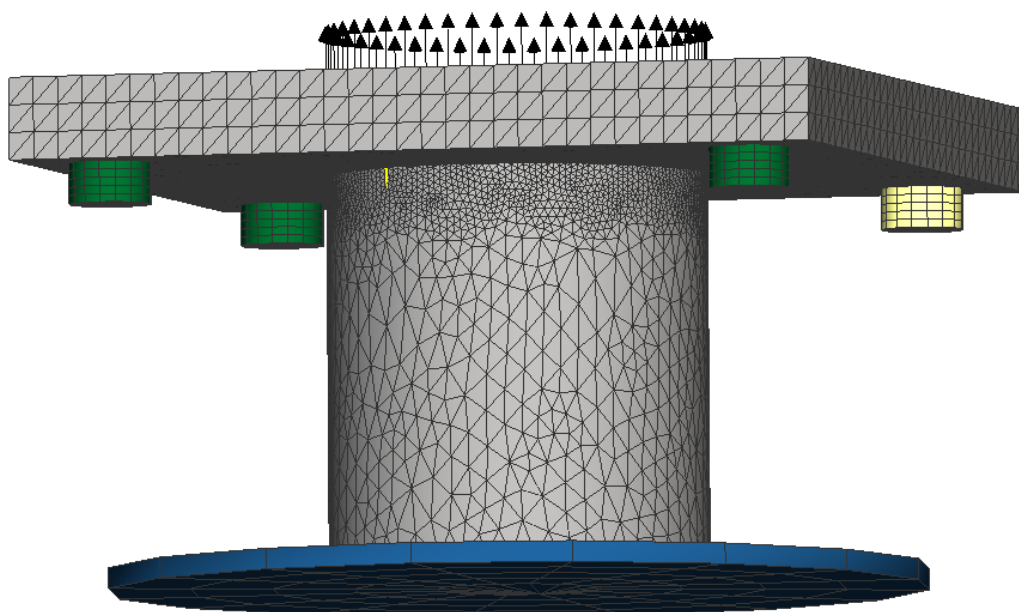
| | Proces 14 | Proces 10 |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| Svařovací rychlost [mm] | 25 | 25 |
| Svařovací výkon [kW] | 17 | 16,4 |
| Efektivita [-] | 0,85 | 0.85 |
| Přední délka svarové čochy a_f [mm] | 0,8 | 0,5 |
| Zadní délka svarové čochy a_r [mm] | 1,2 | 1,5 |
| Šířka svarové čochy b [mm] | 0,85 | 0,6 |
| Hloubka svarové čochy d [mm] | 23 | 25 |
| Gausův poměr [-] | 0 | 0 |
| Vložená energie [$J \cdot mm^{-1}$] | 5780 | 5576 |
| Tepelný faktor [-] | 0,8 | 0,5 |

Nastavení času a zjemnění

Doba svařovacího procesu byla stanovena programem a to na 11,6 s. Doba svařování změnit nelze to se odvíjí od svařovací rychlosti, ale je možné nastavit čas před a po svařování. V tomto případě je možné přidat čas na chladnutí, ale jelikož nebylo chladnutí potřeba. Nebyl tento parametr nastaven. Délka svařovací dráhy je 290,06 mm. Stupeň zjemnění byl nastaven na hodnotu 1.

Upnutí a ustavení svařence

Svařenec byl ustaven na podpůrné pole. Upnutí je provedeno za stejnou plochu jako je ve skutečnosti. Ovšem změna proběhla v upnutí desky jelikož, Simufact neumí vytvořit lisovaný spoj. Proto byly použita ztužidla, která zamezila pohybu desky tak aby to bylo stejné jako při skutečném procesu.

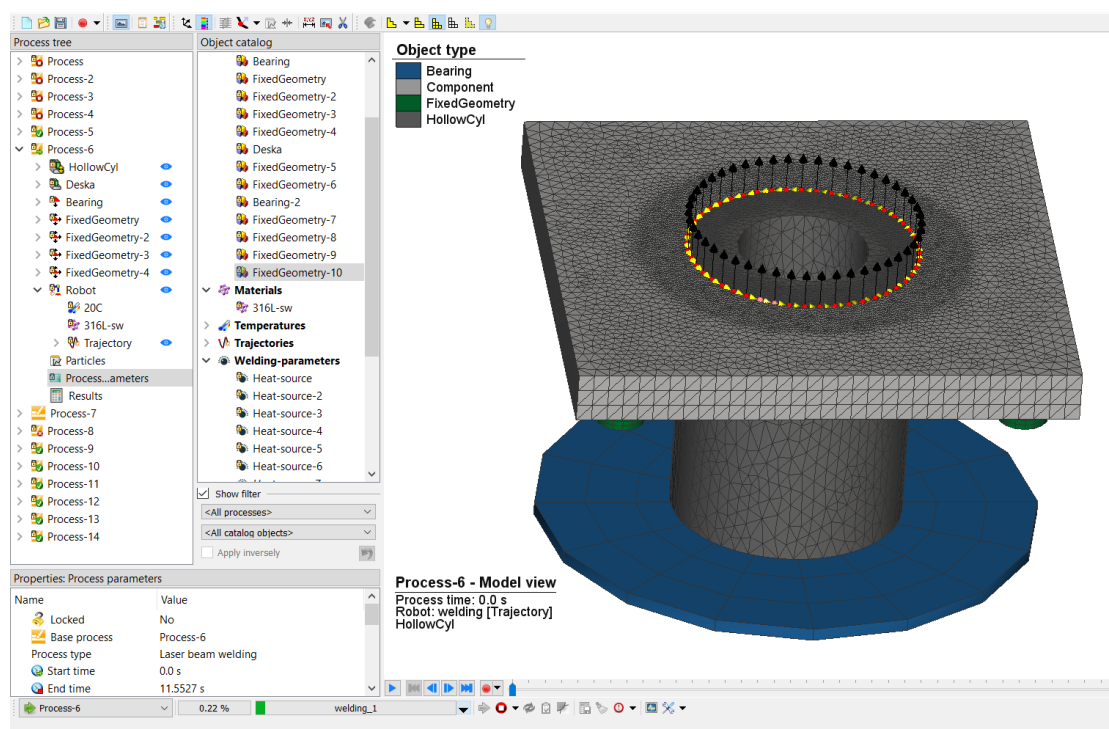


Obrázek 23 – Rozmístění ustavovacích prvků

3.3 Výpočet procesu

Po importu všech potřebných dat, a provedení všech nastavení následuje počítání procesu. Většinou první výpočet slouží jako kalibrační, kde se naladí správné parametry. Pro zrychlení kalibračního procesu se v nastavení procesu vybere pouze teplotní výpočet. To velice významně ovlivní čas tohoto procesu. Po zkrácené kalibraci se spustí už hlavní výpočet, kde vybereme termomechanický výpočet. Dále lze nastavit výpočet fázové přeměny u materiálů, které obsahují ara diagram. Při spouštění procesu si program projekt uloží a zvolí ideální zatížení hardwaru pro výpočet. Na obrázku 24 je zobrazen spuštěný výpočet na začátku procesu. Tento konkrétní výpočet byl spuštěn v termomechanickém režimu. Doba výpočtu se při této konfiguraci pohybovala okolo 16 h. Když se k této době přičte čas, který je

potřebný pro tvorbu modelů a celkového nastavení. Pak se jedna analýza může pohybovat kolem 20 h času.



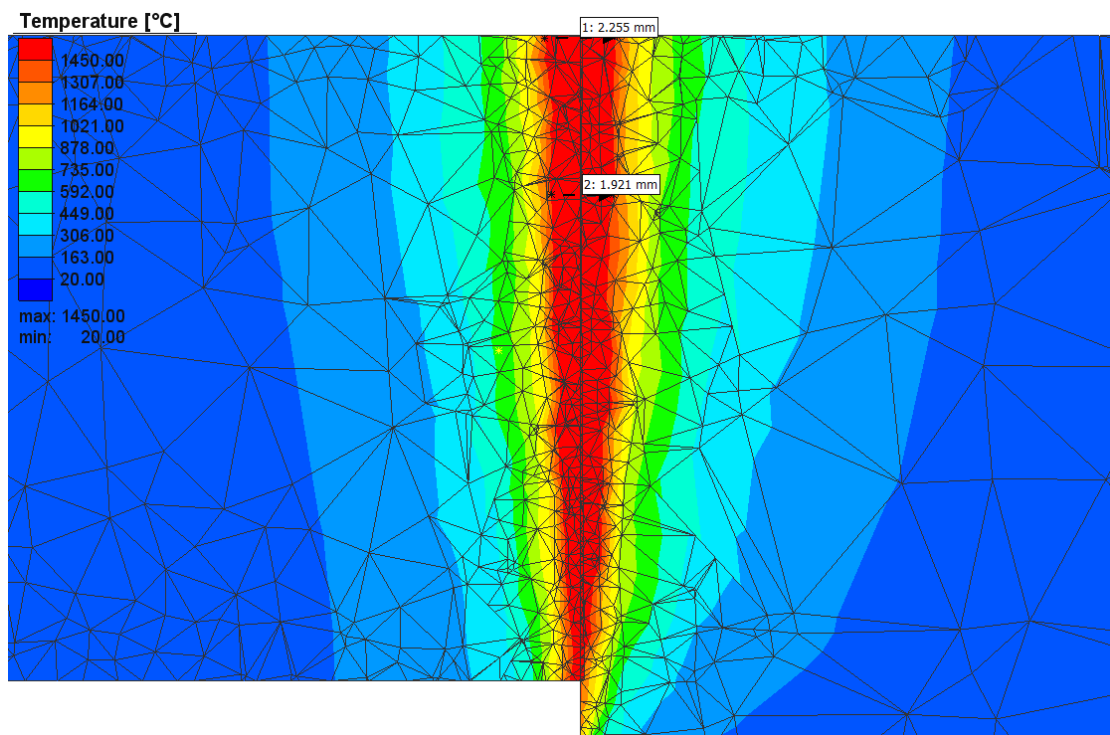
Obrázek 24 – Ukázka spuštěného procesu

3.4 Výsledky numerické simulace

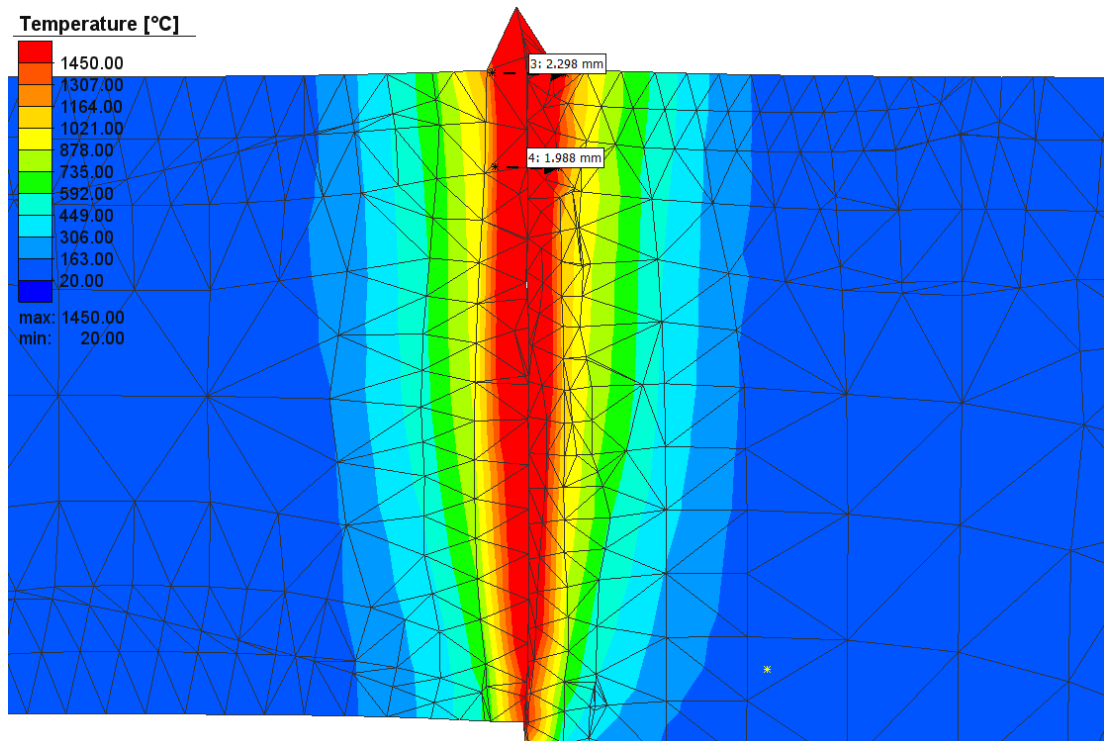
Program Simufact welding nabízí několik druhů výsledků. Jednou z možností je funkce welding monitor (obraz svařování). Ta nabízí výsledky v podobě příčného řezu součástí, na kterém je pomocí barevného škálování zobrazena TOO. V tomto pohledu lze měřit vzdálenost a teplotu TOO. Uživatelé také poskytují celkový pohled na svarovou lázeň. Welding monitor, ale poskytuje pouze teplotní vyhodnocení. Další možností je měření teplotních cyklů pomocí funkce particles (prvky). Jednotlivé prvky jsou rozmístěny stejně jako termočlánky v reálném procesu. Z nich je po té možnost čerpat výsledky v podobě teplotního cyklu, odchylku posunutí, tepelný tok a efektivní napětí.

Teplotní analýza a velikost TOO

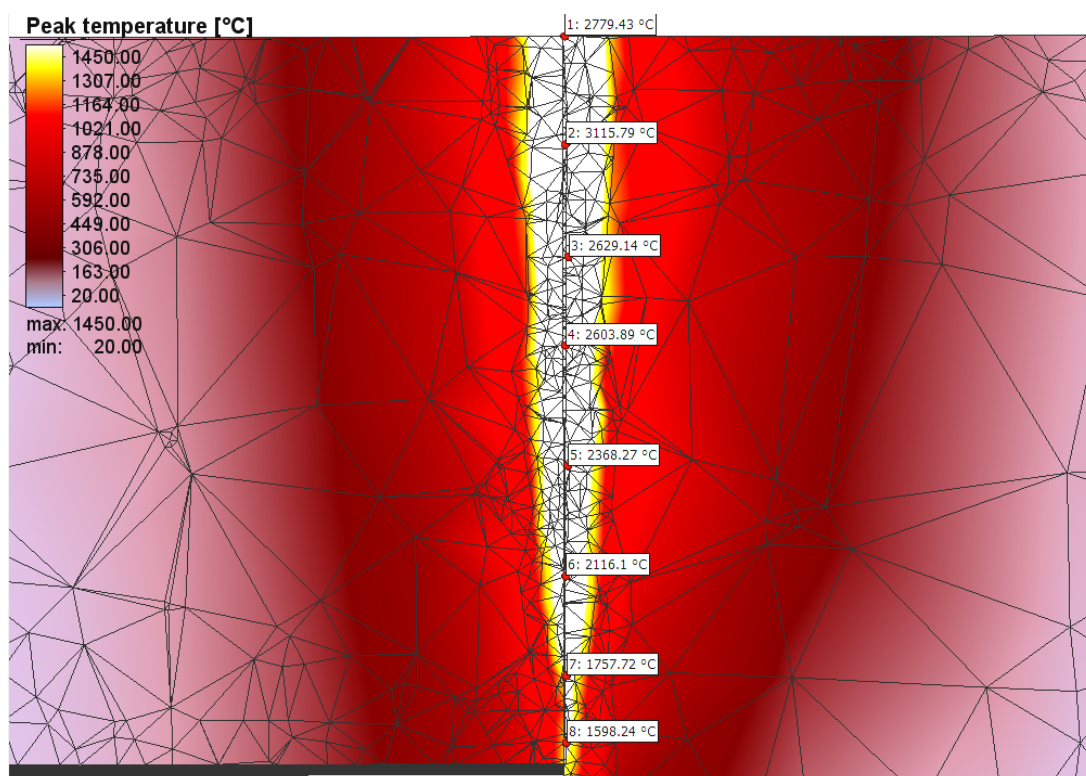
Výsledky teplotní analýzy byly použity z procesu 14 a 10. V těchto procesech bylo použito rozdílné síťování. V procesu 14 byl použit typ hexahedrall a v procesu 10 tetrahedral. Na obrázcích 25 a 26 je možné tento rozdíl vidět. Šířka TOO je pro proces 10 2,255 mm a pro proces 14 je to 2,298.



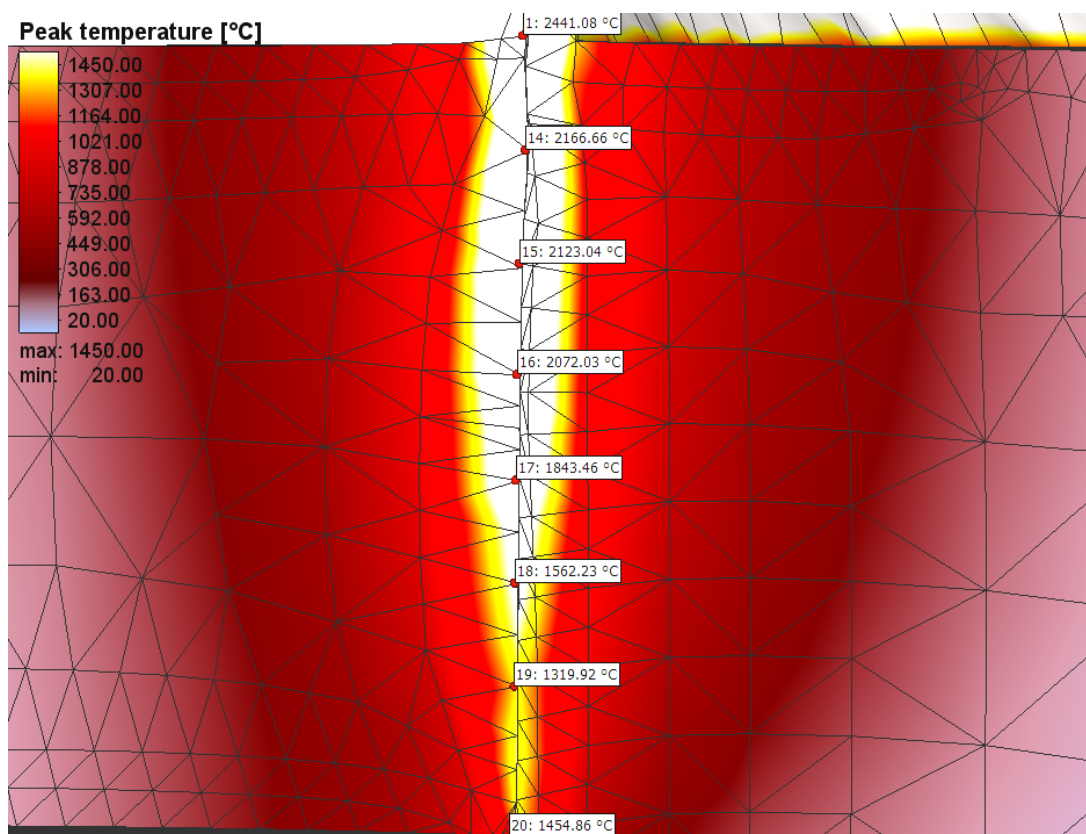
Obrázek 25 – TOO procesu 10



Obrázek 26 – TOO procesu 14

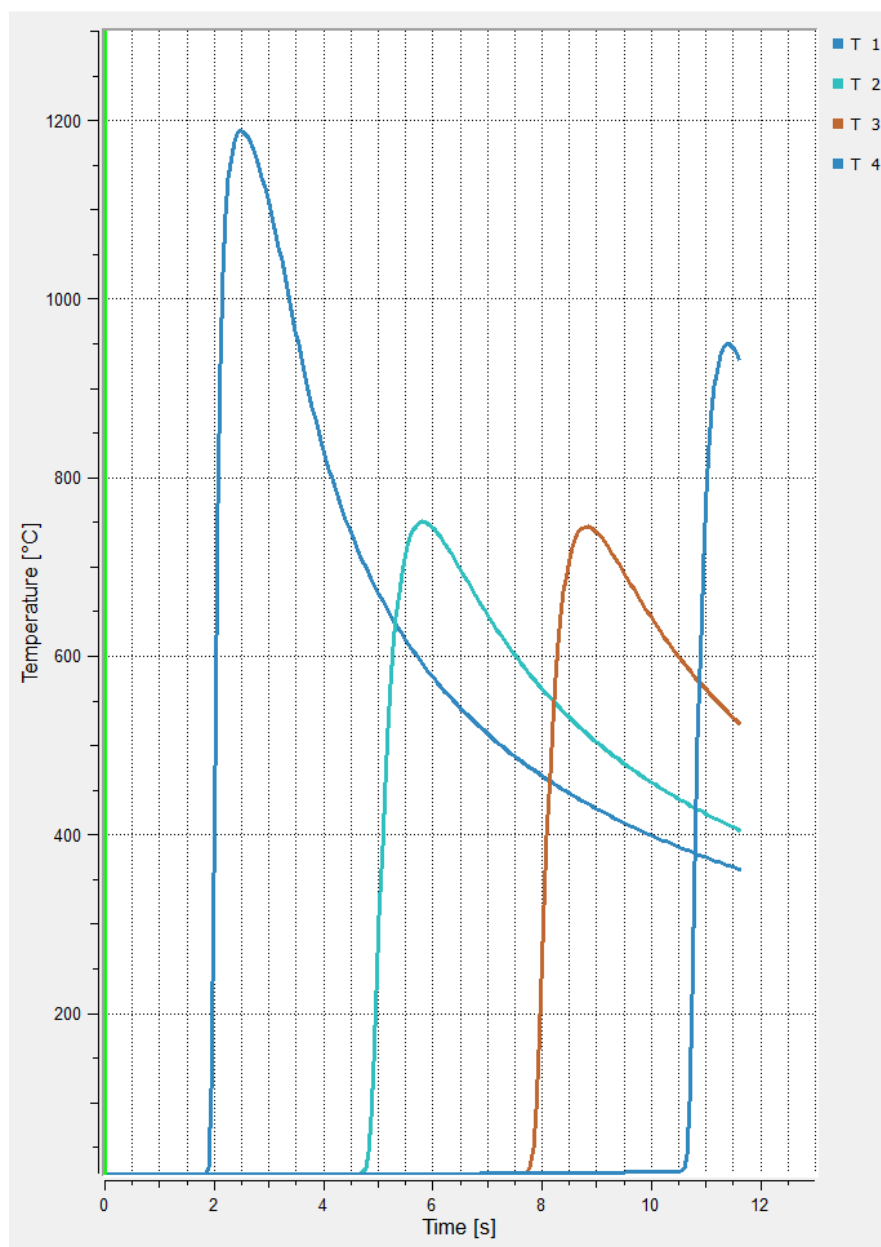


Obrázek 27 – Měření teplot ve svarové lázni (Proces 10)



Obrázek 28 - Měření teplot ve svarové lázni (Proces 14)

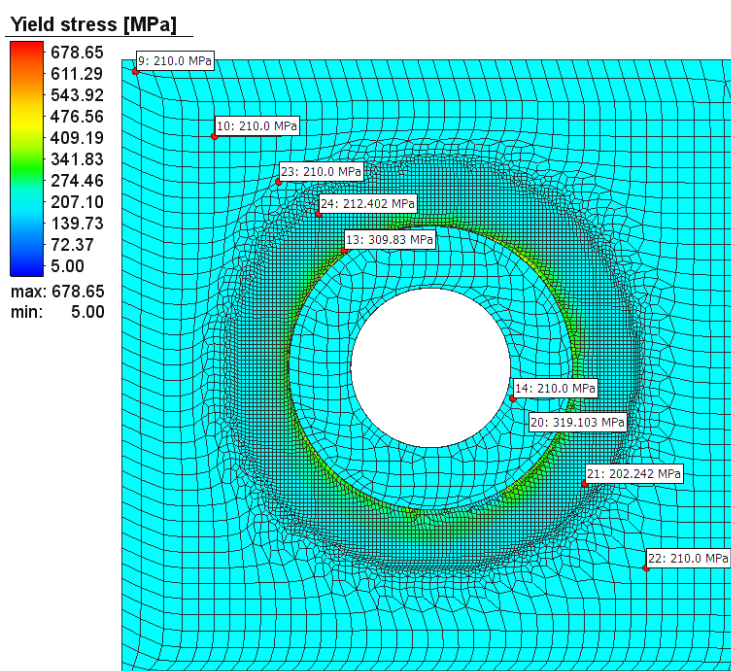
Na obrázcích 27 a 28 je zobrazeno měření teplot ve svarové lázni. V procesu 10 byla naměřena maximální teplota $3115,79^{\circ}\text{C}$ a minimální teplota $1598,24^{\circ}\text{C}$. V procesu 14 byla naměřena maximální teplota $2441,08^{\circ}\text{C}$ a minimální teplota 1454°C .



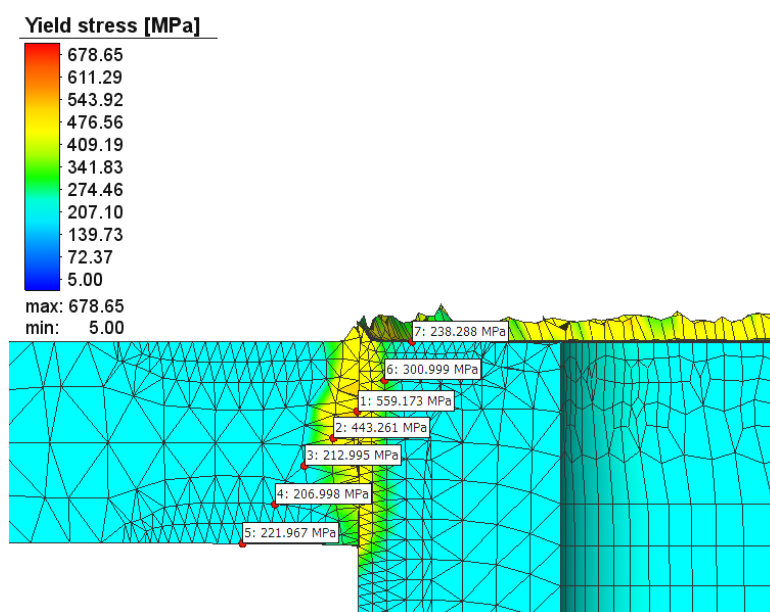
Obrázek 29 - Teplotní cyklus simulovaného procesu

Napěťová analýza

Při této analýze byla měřena mez kluzu. Tato měření byla provedena na procesu 14. Na obrázku 30 bylo provedeno povrchové měření přes uhlopříčku desky a na obrázku bylo měření provedeno v řezu. V TOO je patrný nárůst meze kluzu, a to až na maximální hodnotu 559 MPa.

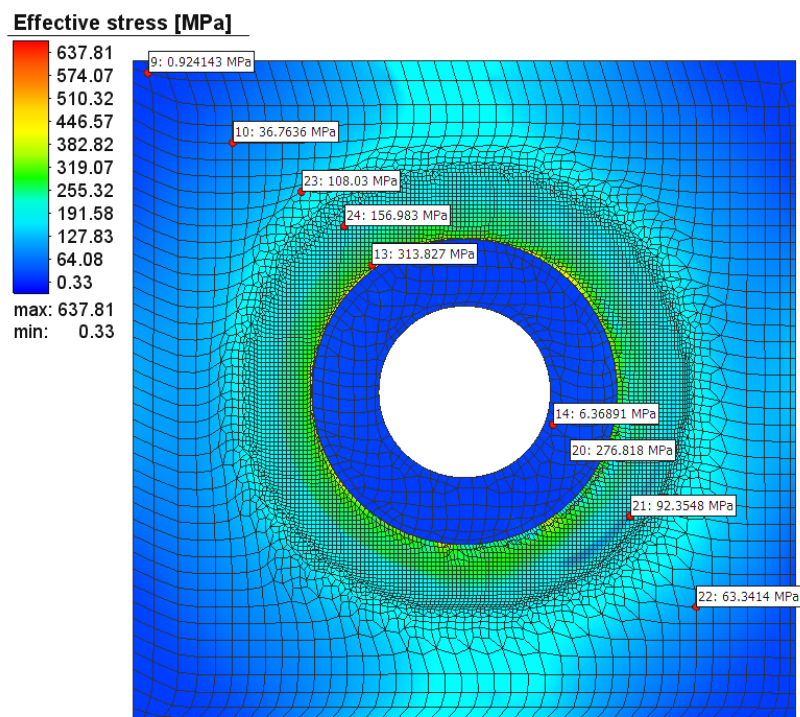


Obrázek 30 - Mez kluzu na povrchu desky

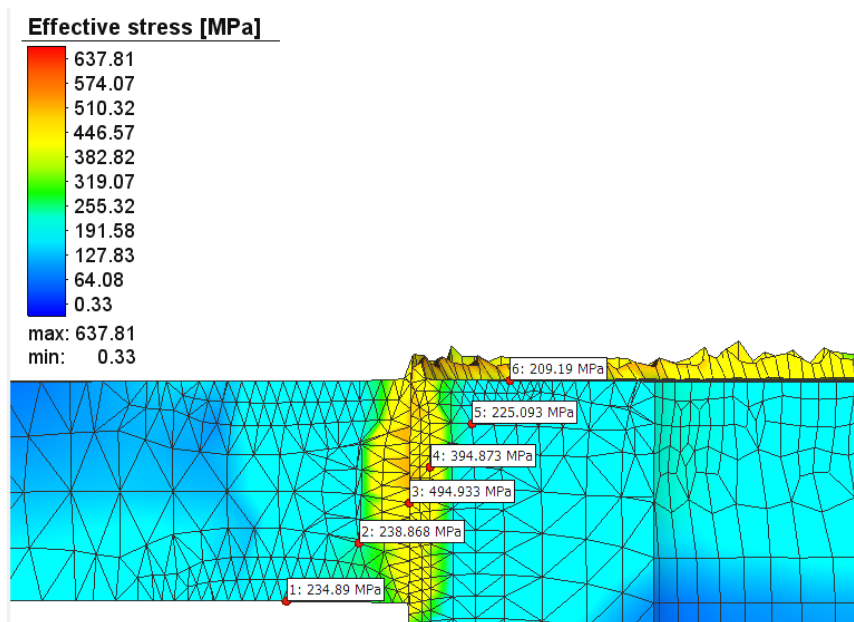


Obrázek 31 - Mez kluzu v řezu desky

Intenzita napětí byla měřena také na procesu 14. Na obrázku 32 je vidět povrchová intenzita napětí, která dosahuje 313 MPa, a v řezu dosahuje maximální hodnota 494 MPa. Tato hodnota byla naměřena na hranicích obou těles.



Obrázek 32 – Intenzita napětí na povrchu desky



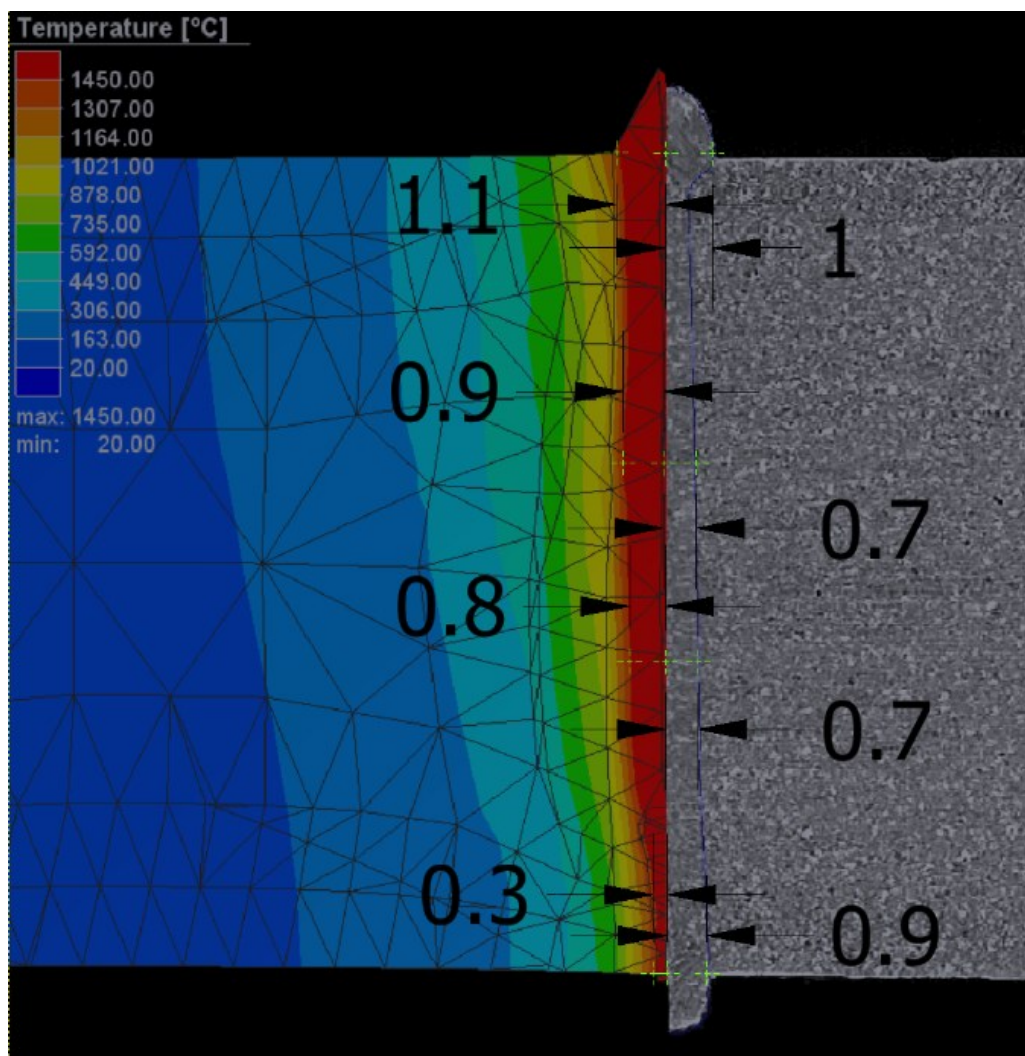
Obrázek 33 – Intenzita napětí v řezu desky

Srovnání simulace s experimentem

Při konfiguraci tepelného zdroje v numerické simulaci, byla prvotní informací pro zpětnou kontrolu šířka TOO. Jak je vidět na obrázku 34 ta je téměř totožná s reálnou. Ovšem parametry nastavení teplotních zdrojů se liší. Parametry jako zaostřovací proud a zaostřovací vzdálenost nemůžeme v programu nastavit. V tabulce 8 jsou srovnány hodnoty stejných parametrů jednotlivých tepelných zdrojů. Svar byl zhotoven na jeden průchod, tato hodnota je totožná, dále i svařovací rychlost. Výkon elektrického oblouku se však diametrálně liší. Zatím co u numerické simulace byl použit výkon 17 kW u experimentu to byla hodnota 12,375 kW. Tento rozdíl může být ovlivněn několika faktory. Jedním z nich může být absence nastavení dalších parametrů tepelného zdroje při numerické simulaci. Řešením této absence by mohl být přepočet, který by tyto parametry obešel a při zadání rychlosti svařování, počtu průchodů a výkonu by navrhl adekvátní svařovací výkon, který by se mohl nastavit do reálného zařízení. Byla by to pouze hrubá hodnota výkonu, protože závisí také na tepelných vlastnostech materiálu. Ideální by bylo do přepočtu zahrnout i tyto parametry. Další faktor je síťování. Ten také ovlivňuje šíření tepla v materiálu a velice významně. V procesu 14 byl použit typ Hexmesh. Ten je podle dodavatele numerického softwaru ideální pro tlusté svařence jednoduchých rozměrů. Avšak důležitý ukazatel je jemnost síťování, od které se odvíjí čas výpočtu.

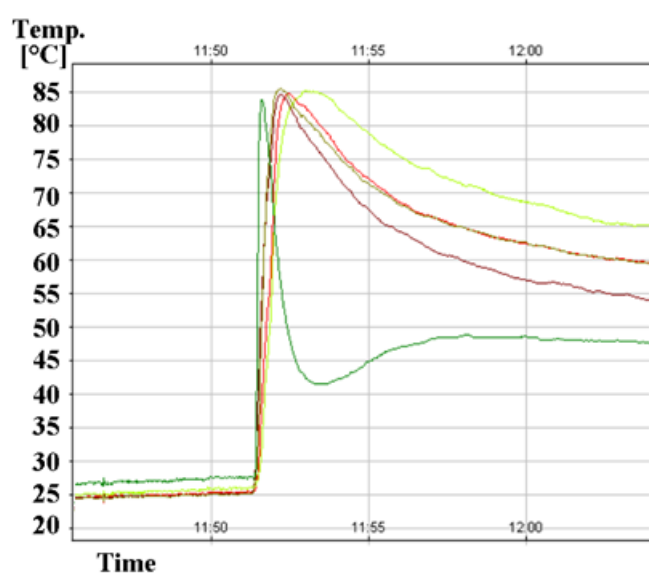
Tabulka 8 – Srovnání vstupních parametrů experimentu a simulace

| | Experiment | Proces 14 |
|---|------------|-----------|
| Počet průchodů [-] | 1 | 1 |
| Výkon elektrického oblouku [kW] | 12,375 | 17,000 |
| Svařovací rychlost [mm.s⁻¹] | 25 | 25 |

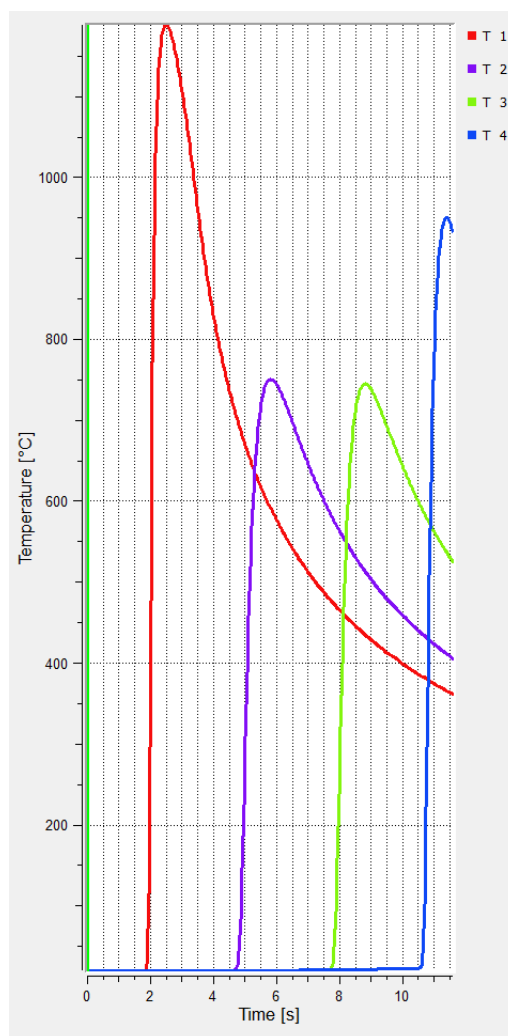


Obrázek 34 – Srovnání TOO experimentu a simulace

Teplotní cyklus obou procesů je vidět na obrázcích 34 a 35. Maximální teplota je u experimentu 85 °C a u simulace 87 °C. Rozdílná je však doba ohřátí na tuto teplotu. U experimentu je to 1,5 s a u simulace 6,5 s. Tento rozdíl může být způsoben nepřesným měřením termočlánků u experimentu, chybnými hodnotami tepelných vlastností materiálu nebo nevhodně zvoleným zdrojem tepla.



Obrázek 35 – Teplotní cyklus experimentu



Obrázek 36 – Teplotní cyklus simulace

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit numerickou simulaci elektronového svařování za účelem snížení počtu testů reálného experimentu. Svařování elektronovým paprskem je finančně nákladná technologie a snížení počtu testů má velký ekonomický význam. Simulace byla vytvořena v programu Simufact welding 8.0.

V úvodní části této práce byl charakterizován svařovaný materiál. Jedná se o austenitickou ocel s označením 316L. Bylo popsáno její chemické složení, mechanické a fyzikální vlastnosti. Dále byly rozebrány klíčové vlastnosti a použití této oceli. Jako další krok byla popsána technologie elektronového svařování. Ze začátku se tato metoda používala pouze v kosmickém průmyslu. Průběhem let však prostoupila i do dalších odvětví jakož je letecký, jaderný a chemický průmysl. Tato průmyslová odvětví mají jedno společné. Kladou velké nároky na kvalitu svarových spojů. Elektronové svařování pracuje na principu přeměny kinetické energie na tepelnou. Volné elektrony jsou emitovány na katodě a pomocí urychlovací anody jsou uváděny do pohybu. Při dopadu na svařovaný materiál dojde k přeměně energie a vytvoření svarového spoje. Celý tento proces je prováděn ve vakuu a je okem neviditelný. Účinek elektronového paprsku je vidět až v místě dopadu elektronů, kde dojde k ohřátí. V kapitole 2.7 byl popsán experiment elektronového svařování a zobrazeny jeho výsledky.

Na začátku praktické části diplomové práce byla popsána numerická simulace, metoda konečných prvků a software Simufact Welding 8.0. V další části už následuje popis tvorby samotného procesu. Jednotlivé díly určené ke svařování byly vymodelovány v programu Autodesk Inventor 2018. Následně byly importovány do simulačního programu. Po jejich vložení do procesního pole jim byl přiřazen materiál, což byla ocel 316L a jednotlivé modely byly vytvořena síť. Pro srovnání byly použity dva typy sítě. V procesu 10 typ Tetmesh a prvek Tetrahedral a v procesu 14 Hexmesh a prvek Hexahedral. Při stejné velikosti hrany a zjemnění byly výsledkem rozdílné počty prvků v síti. Součást nazvaná válec má při síti Tetmesh 36170 prvků a při síti Hexmesh 39452 prvků. Dalším krokem bylo umístění obou součástí vůči sobě do požadované polohy a poté jejich následné upnutí na podpůrnou plochu. V reálném experimentu byly součásti zalisovány do sebe, v numerické analýze byly přidány ztužidla k docílení stejných vlastností jako má lisovaný spoj. Procesy 14 a 10 mají rozdílné nastavení teplotních zdrojů. Tato konfigurace je patrná v tabulce 7. Přidáním svařovací

dráhy a nastavením zbývajících parametrů byla konfigurace procesu dokončena a byl spuštěn výpočet. Doba výpočtu činila 16 h. Po dokončení výpočtu byly přidány měřicí prvky, které v grafu vykreslily teplotní cyklus svařovacího procesu. Velikost tepelně ovlivněné oblasti z výpočtu se přiblížila té z experimentu. Tato skutečnost je zobrazena na obrázku 34. Jednotlivé vzdálenosti byly změřeny a zakresleny. Na povrchu a uprostřed se odchylka pohybuje v rozmezí dvou desetin milimetru. U kořene svaru je však rozdíl hodnot 0,6 mm. To může být způsobeno několika důvody. Jeden z nich je nedostačující nastavení teplotního zdroje. Teplotní zdroj by pro tuto technologii by měl být charakterizován více parametry. Například zaostřovacím proudem a zaostřovací vzdáleností. Tyto parametry by mohly pomoci k lepšímu protavení kořenové oblasti svarového spoje. Další srovnání je patrné na obrázcích 34 a 35. Je zde vidět rozdíl v teplotních cyklech. Konkrétně v rychlosti ohřevu materiálu. V experimentu došlo k ohřátí $60\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ a při numerické analýze $26\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ po odečtení z grafů. Tento rozdíl mohla způsobit celá řada faktorů. Od špatného zadání fyzikálních vlastností svařovaného materiálu, nízký počet prvků při síťování nebo chybným měřením termočlánků. K získaným výsledkům bude přihlédnuto, při nastavení reálného tepelného zdroje. Dále bude provedeno opakování měření experimentu pomocí termočlánků k ověření předchozího měření.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Vladislavu Ochodkovi za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HARVEY, Philip D. *Engineering properties of steel*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, c1982. ISBN 978-0-87170-144-2.
- [2] K. Obrtlík, T. Kruml and J. Polák, Dislocation structures in 316L stainless steel cycled with plastic strain amplitudes over a wide interval, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 187, pp. 1-9, 1994,
- [3] O'BRIE, Annette a Carlos GUZMA, ed. *Welding Handbook: WELDING PROCESSES, PART 2*. 9. Miami: American Welding Society, 2007. ISBN 978-0-87171-053-6.
- [4] *Stainless Steel: Grade Datasheets* [online]. Atlas Steels Technical Department, 2013 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas%20Grade%20datasheet%20-%20all%20datasheets%20rev%20Aug%202013.pdf>
- [5] *Study of crack initiation in low-cycle fatigue of an austenitic stainless steel*. Francie, 2011. Disertace. Ecole Centra de Lille.
- [6] Spencer K, Embury JD, Conlon KT, Véron M, Bréchet Y. *Mater Sci Eng, A* 2004; 387-389:873
- [7] S. E. Moussavi Torshizi, Ecrouissage cyclique d'aciers inoxydables austénitiques, ferritiques et austéno-ferritiques: influence de l'histoire du chargement, PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 1997.
- [8] Weman, Klas. (2012). *Welding Processes Handbook* (2nd Edition) - 10.1 Introduction. Woodhead Publishing. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BT3LC3/welding-processes-handbook/submerged--introduction>
- [9] KOLEVA, E.G. a G.M. MLADENOV. *Practical Aspects and Applications of Electron Beam Irradiation: Experience on electron beam welding*. Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences. Bulgaria, 2011. ISBN 978-81-7895-541-4.

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 – Shaefflerův digram pro austenitické oceli [6] | 13 |
| Obrázek 2 – Mikrostruktura oceli 316L [6]..... | 14 |
| Obrázek 3 – Cyklické namáhání oceli 316 [7]..... | 14 |
| Obrázek 4 – Hysterezní smyčka oceli 316 [7]..... | 15 |
| Obrázek 5 – Závislost teploty na tenzoru napětí..... | 15 |
| Obrázek 6 - Tepelná vodivost oceli 316L | 16 |
| Obrázek 7 - Schéma zařízení pro tvorbu elektronového paprsku [3]..... | 18 |
| Obrázek 8 - Princip svařování EBW [1]..... | 19 |
| Obrázek 9– Velikost TOO pro jednotlivé technologie svařování [9] | 21 |
| Obrázek 10– Způsoby vychýlení paprsku [3]..... | 21 |
| Obrázek 11 – Typy zařízení EBW [3]..... | 22 |
| Obrázek 12– Možnosti svařitelnosti materiálů technologií EBW [3] | 23 |
| Obrázek 13– Sestava svařovaných součástí | 25 |
| Obrázek 14 – Ukázka rozmístění termočlánků | 26 |
| Obrázek 15 – Makrostruktura svařovaných součástí | 27 |
| Obrázek 16 - Teplotní cyklus reálného svařování..... | 27 |
| Obrázek 17 - Analýza zbytkového napětí..... | 28 |
| Obrázek 18 – Analýza vertikálního zkroucení..... | 28 |
| Obrázek 19 – Goldakův dvojitý elipsoid..... | 30 |
| Obrázek 20 – Komolý kužel | 30 |
| Obrázek 21 – Válec (Typ síťování – Tetmesh, typ prvku – Tetrahedral (134))..... | 31 |
| Obrázek 22 – Válec (Typ síťování – Hexmesh, typ prvku – Hexahedral)..... | 32 |
| Obrázek 23 – Rozmístění ustavovacích prvků..... | 34 |
| Obrázek 24 – Ukázka spuštěného procesu | 35 |
| Obrázek 25 – TOO procesu 10 | 36 |
| Obrázek 26 – TOO procesu 14 | 36 |
| Obrázek 27 – Měření teplot ve svarové lázni (Proces 10)..... | 37 |
| Obrázek 28 - Měření teplot ve svarové lázni (Proces 14) | 37 |
| Obrázek 29 - Teplotní cyklus simulovaného procesu | 38 |
| Obrázek 30 - Mez kluzu na povrchu desky | 39 |
| Obrázek 31 - Mez kluzu v řezu desky | 39 |
| Obrázek 32 – Intenzita napětí na povrchu desky | 40 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 33 – Intenzita napětí v řezu desky..... | 40 |
| Obrázek 34 – Srovnání TOO experimentu a simulace..... | 42 |
| Obrázek 35 – Teplotní cyklus experimentu..... | 43 |
| Obrázek 36 – Teplotní cyklus simulace | 43 |

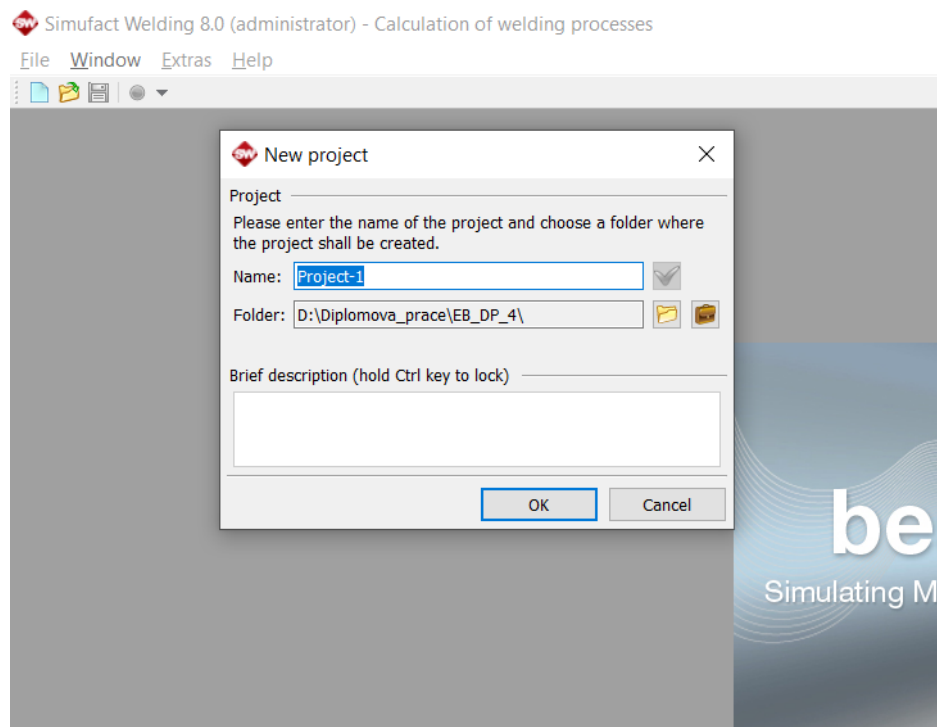
SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 – Přehled značení oceli | 11 |
| Tabulka 2 – Chemické složení [4] | 11 |
| Tabulka 3 – Přehled ekvivalentů..... | 12 |
| Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti [4] | 12 |
| Tabulka 5 – Fyzikální vlastnosti | 16 |
| Tabulka 6 – Výsledné svařovací parametry..... | 25 |
| Tabulka 7 – Nastavení svařovacích zdrojů tepla | 33 |
| Tabulka 8 – Srovnání vstupních parametrů experimentu a simulace..... | 41 |

PŘÍLOHA 1 – VYTVOŘENÍ PROCESU NUMERICKÉ ANALÝZY

1. Vytvoření projektu

Po spuštění aplikace Simufact Welding 8 (pro správné fungování použít → spustit jako správce) můžeme začít s tvorbou projektu.



→ File → New project

- Name (Project – 1)
- Folder (D:\Diplomova_prace\EB_DP_4\)

→ OK

Program zobrazí tabulku Process – Settings, ve které zvolíme základní parametry procesu. Tento proces bude svařování elektronovým paprskem mělo by tedy být zvolen typ procesu elektronový paprsek, ale z důvodu častých chybových hlášení v tomto typu procesu volíme proces pro laserové svařování.

- Process type: Laser beam welding

- Ambient temperature: 20.0 °C
- Gravity (pouze zaškrtnout ponechat základní nastavení)
- Components: 2
- Bearings: 1
- Fixed geometries: 4
- Robots: 1

→ OK

Process - Settings

Properties

Process type: Laser beam welding

Ambient temperature: 20.0 °C

☒ Gravity

Acceleration: 9.80665 m/s²

x: 0 y: 0 z: -1

Components

☐ Use symmetry plane

Components: 2

Bearings: 1

Fixed geometries: 4

Fixed nodes: 0

Clampings: 0

Local joints: 0

Robots: 1

Description

Preprocessing settings

Synchronize with the configuration file: Synchronize

Brief description (hold Ctrl key to lock)

OK Cancel

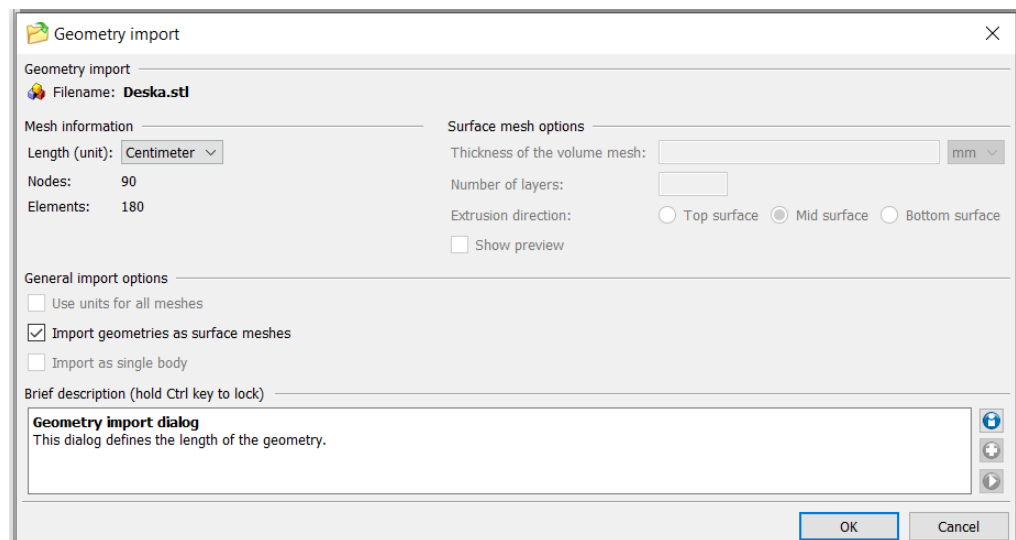
2. Zadání vstupních dat

Po odkliknutí tohoto dialogového pole se dostaneme do pracovního prostředí programu. Nejprve je nutné dodat správná vstupní data. Začíná se od jednotlivých svařovaných součástí, které se importují do katalogu, následně se vůči sobě správně umístí.

→ Geometries→ Import

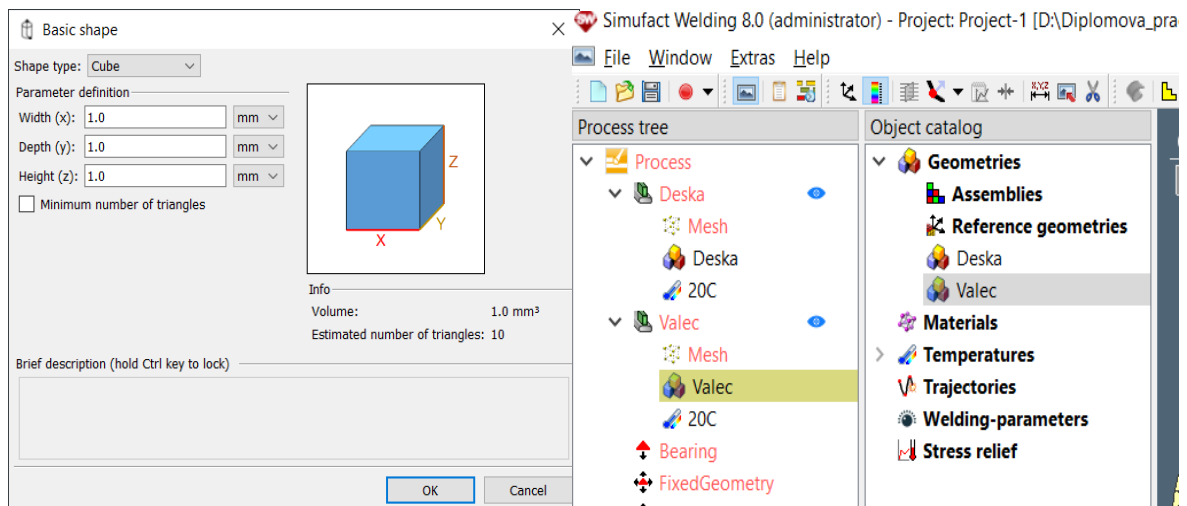
- Length: Centimeter (Jednotky zvolte podle toho, jak je uložíte v CAD programu, nejlépe v mm.)
- Import geometries as surface meshes (Pokud tento bod nezaškrtnete, Simufact vám vytvoří duté součásti, které jsou pro simulaci nevhodné.)

→ OK



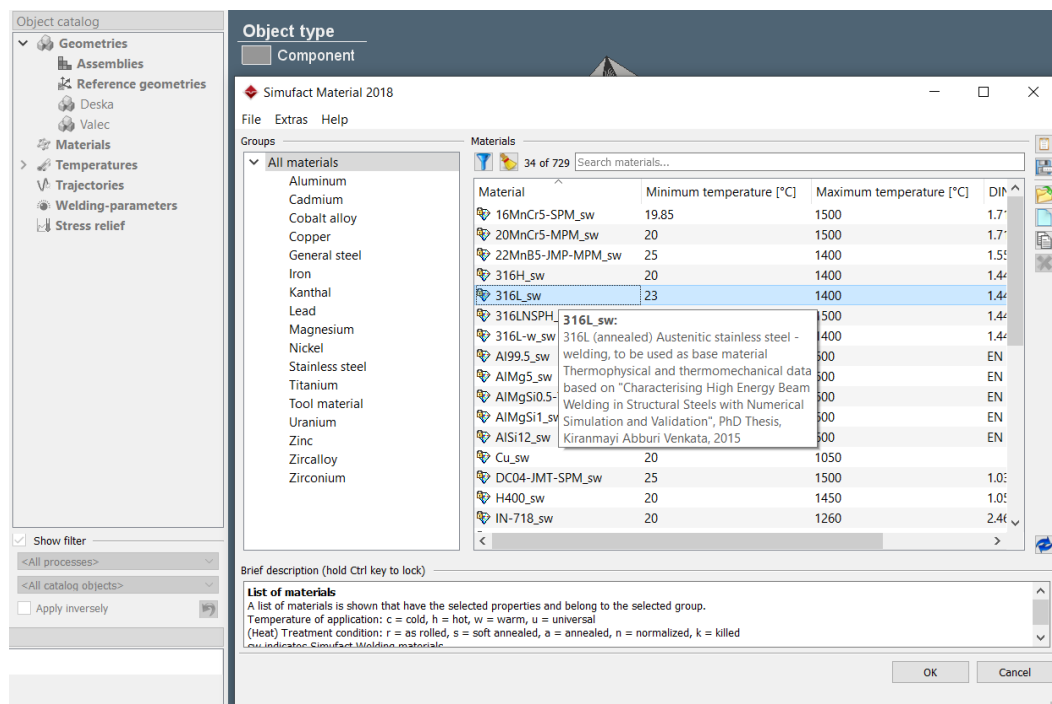
Tuto akci opakujeme i s druhou součástí, stejným postupem. Po přidání je nutné obě součásti přemístit z Object catalog do Process tree, kde je pro každou součást zvláštní místo. Jednoduchým přidržením levého tlačítka a tahem myši se komponenty přemístí na své místo. Jednoduché součásti se dají vytvořit i v program Simufact. Je možné si vybrat ze základních geometrických těles.

→ Geometries→ Basic shape

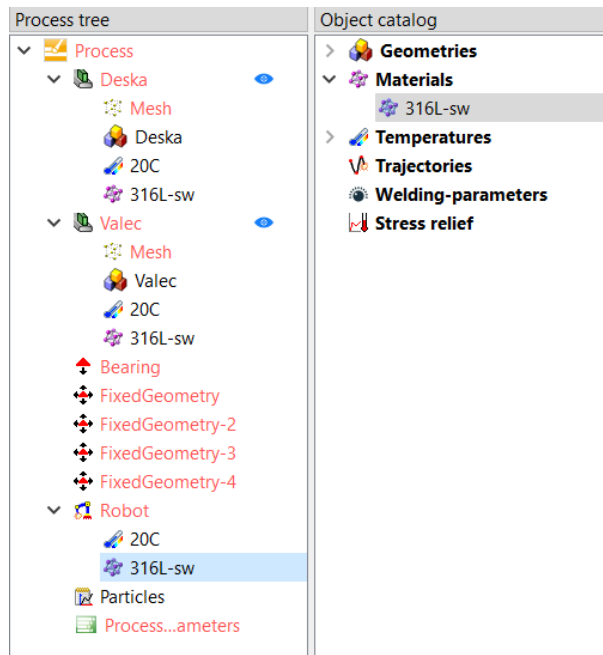


Dále následuje volba materiálu a jeho následná implementace do Process tree, k jednotlivým součástím.

→Materials→Library→volba materiálu (316L_sw)→OK



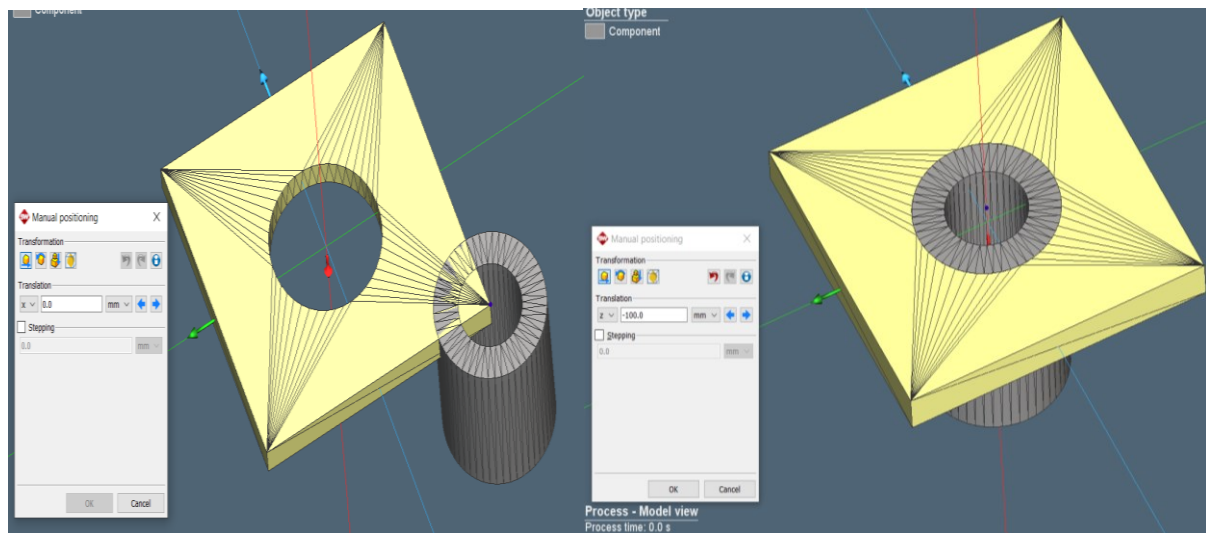
Následný krok je přiřazení materiálu k jednotlivým dílům a do svařovacího robota. Funguje stejný princip jako přesun modelů do Process tree.



Následuje umístění součástí vůči sobě do správné polohy.

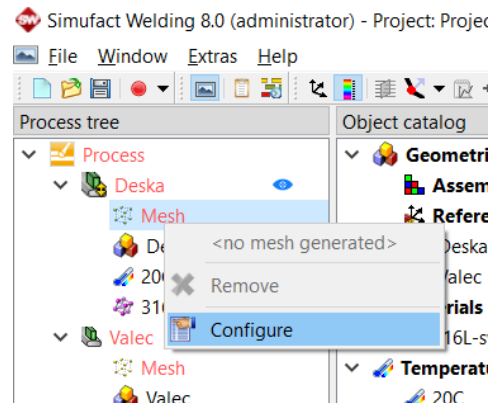
Process → Model view → Deska → Positioning → Transformation → Translate

Pomocí os x,y a se posune deska do správné polohy



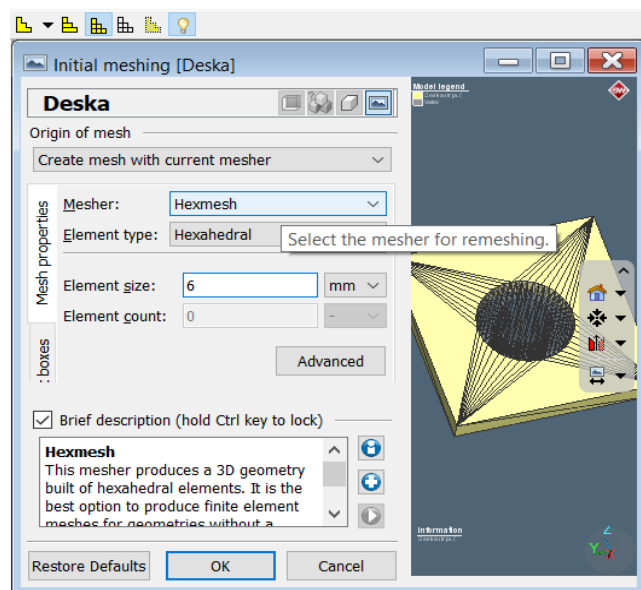
→ OK

→Mesh→ Configure



→ Mesh properties

- Mesher: Hexmesh
- Element type: Hexahedral
- Element size: 6 mm

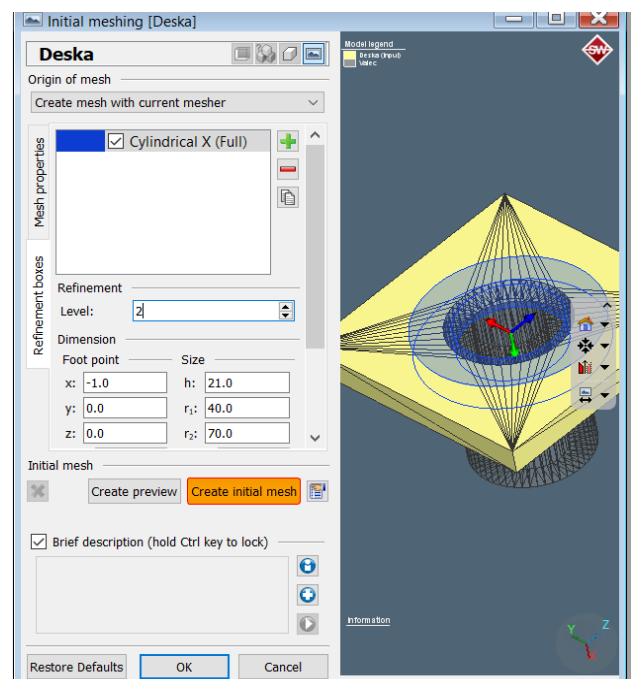


→ Refinement boxes

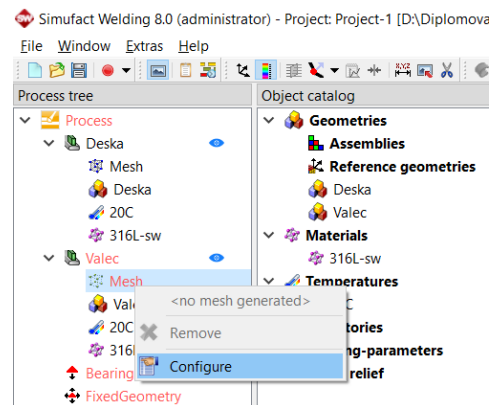
- [illegible]

→ Create initial mesh

→ OK

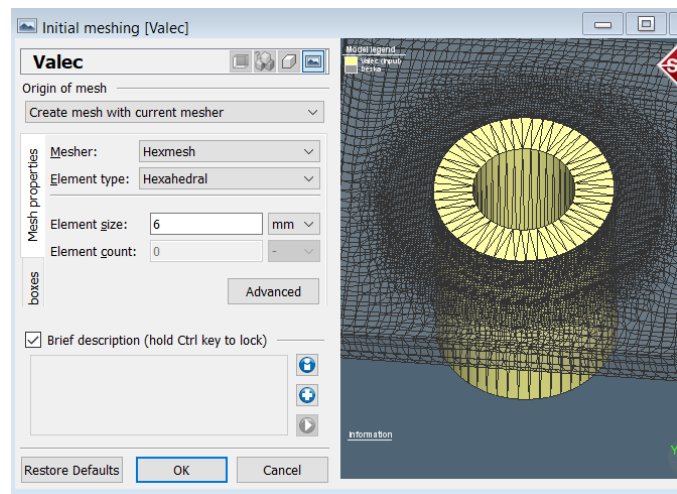


→Mesh→ Configure



→ Mesh properties

- Mesher: Hexmesh
- Element type: Hexahedral
- Element size: 6 mm

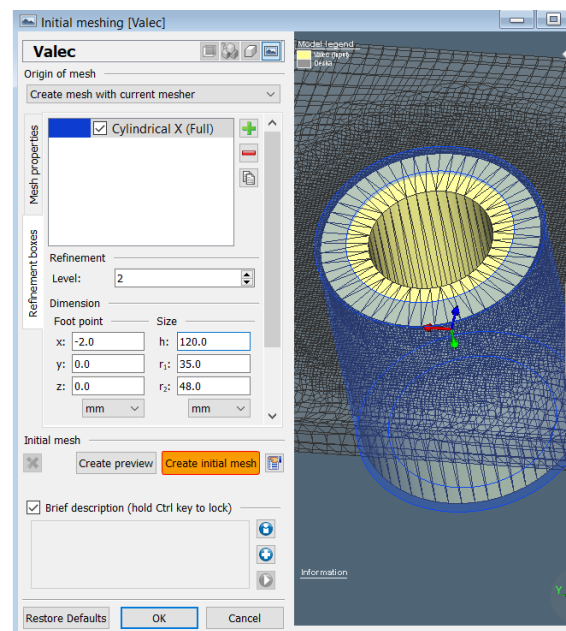


→ Refinement boxes

- Add a new refinement box: Cylindrical X (Full)
- Level: 2
- Dimension: x: -2 h: 120
y: 0 r₁: 35
z: 0 r₂: 48

→ Create initial mesh

→ OK

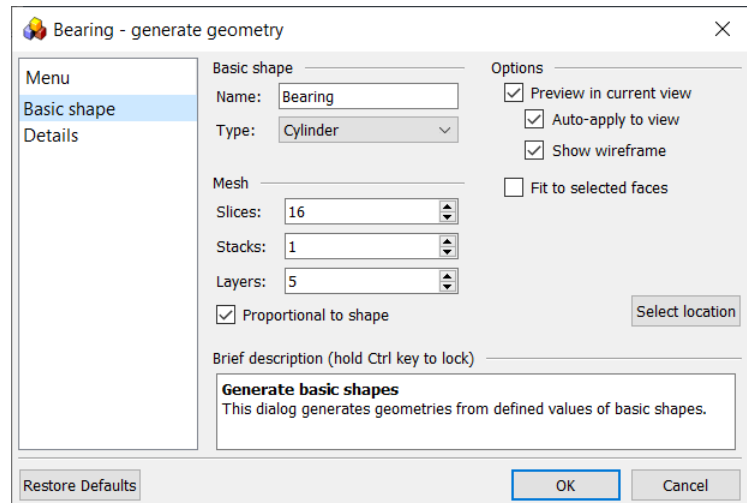


Následuje vytvoření podpěrného elementu, který funguje jako pracovní deska. Na tuto desku se následně umístí sestava. Po-té se vytvoří svěrky, které zamezí pohybu sestavy.

→ Bearings→ Generate geometry→ Select location

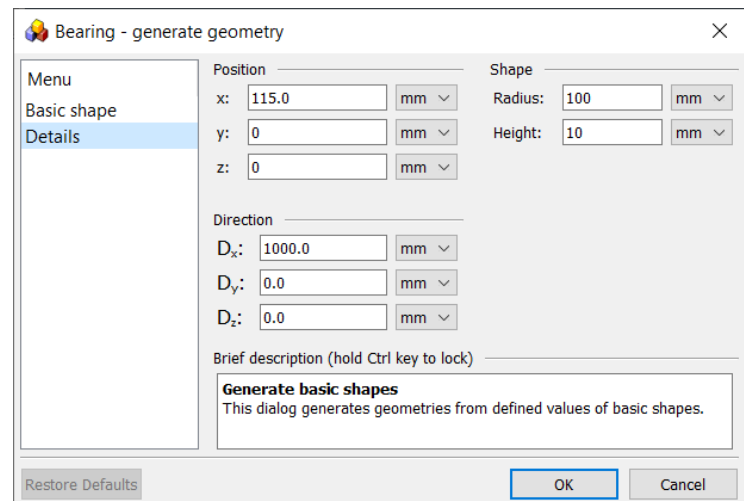
→ Basic shape

- Type: Cylinder
- Slices: 16
- Stacks: 1
- Layers: 5



→ Details

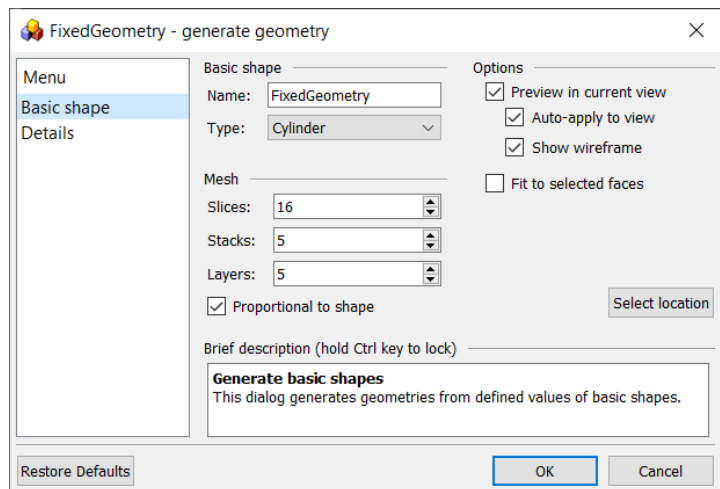
- Position: x: -2
y: 0
z: 0
- Direction D_x: 1000
D_y: 0
D_z: 0
- Shape: Radius: 100
Height: 10



→ FixedGeometry → Generate geometry → Select location

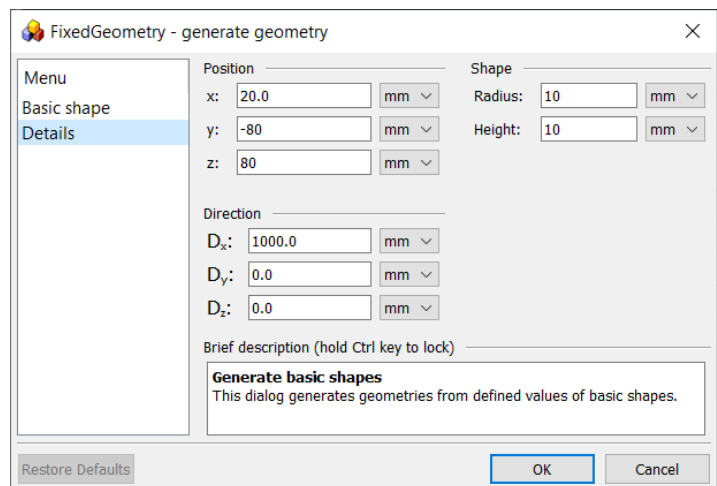
→ Basic shape

- Type: Cylinder
- Slices: 16
- Stacks: 5
- Layers: 5



→ Details

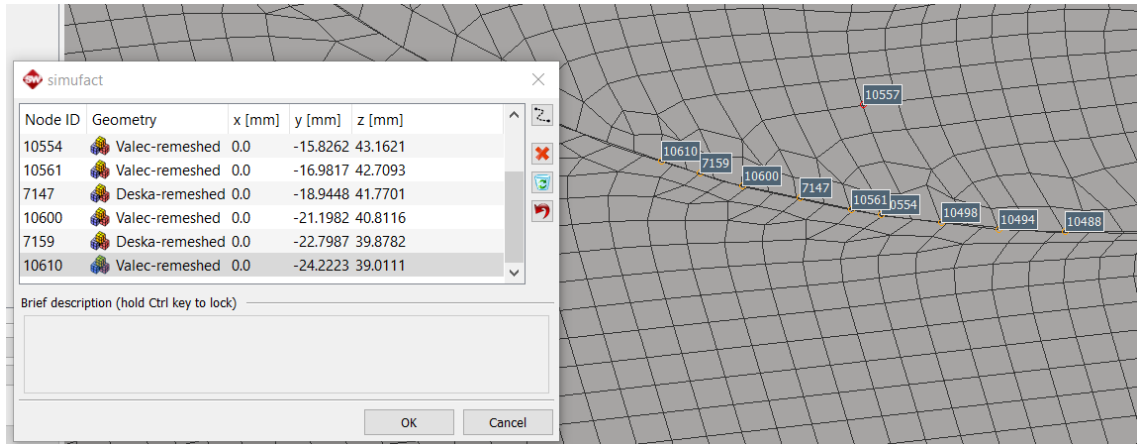
- Position: x: 20
y: -80
z: 80
- Direction D_x: 1000
D_y: 0
D_z: 0
- Shape: Radius: 10
Height: 10



Tento postup je stejný i pro ostatní svěrky.

Vytvoření svařovací dráhy.

→ Trajectories → New weld line → Select nodes from process components



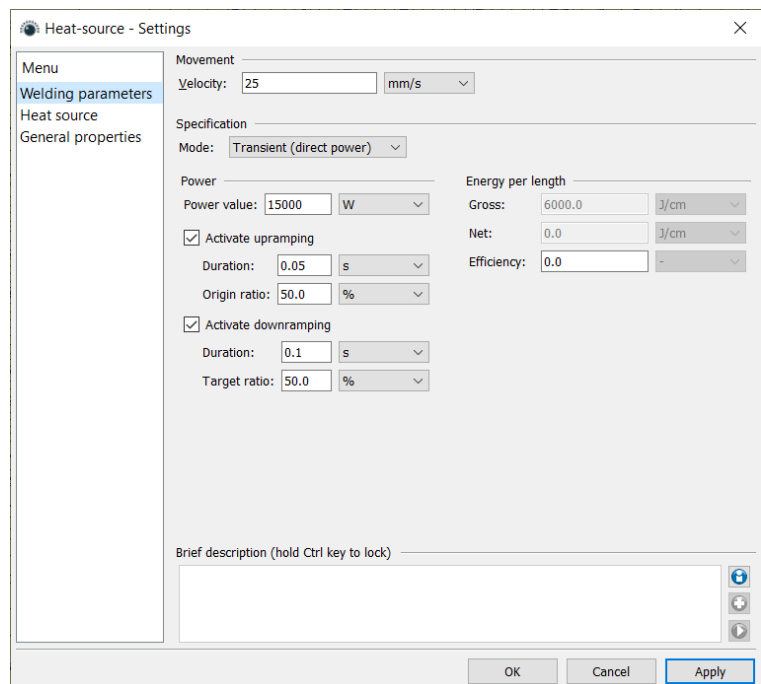
→ OK

Svařovací parametry a zdroj tepla.

→ Welding – parameters → New heat source parameter

→ Welding parameters

- Velocity: 25
- Mode: Trans. (direct power)
- Power: 15000 W
- Efficiency: 0,85

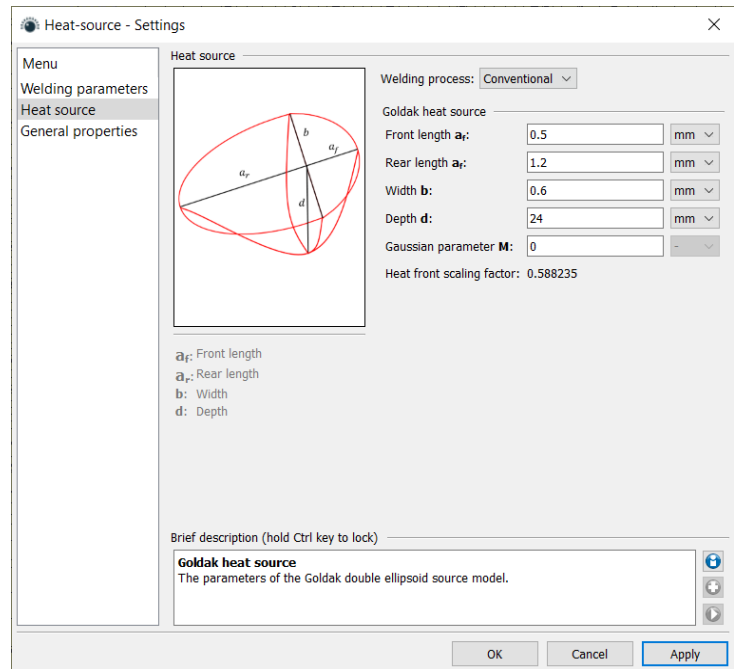


→ Heat source

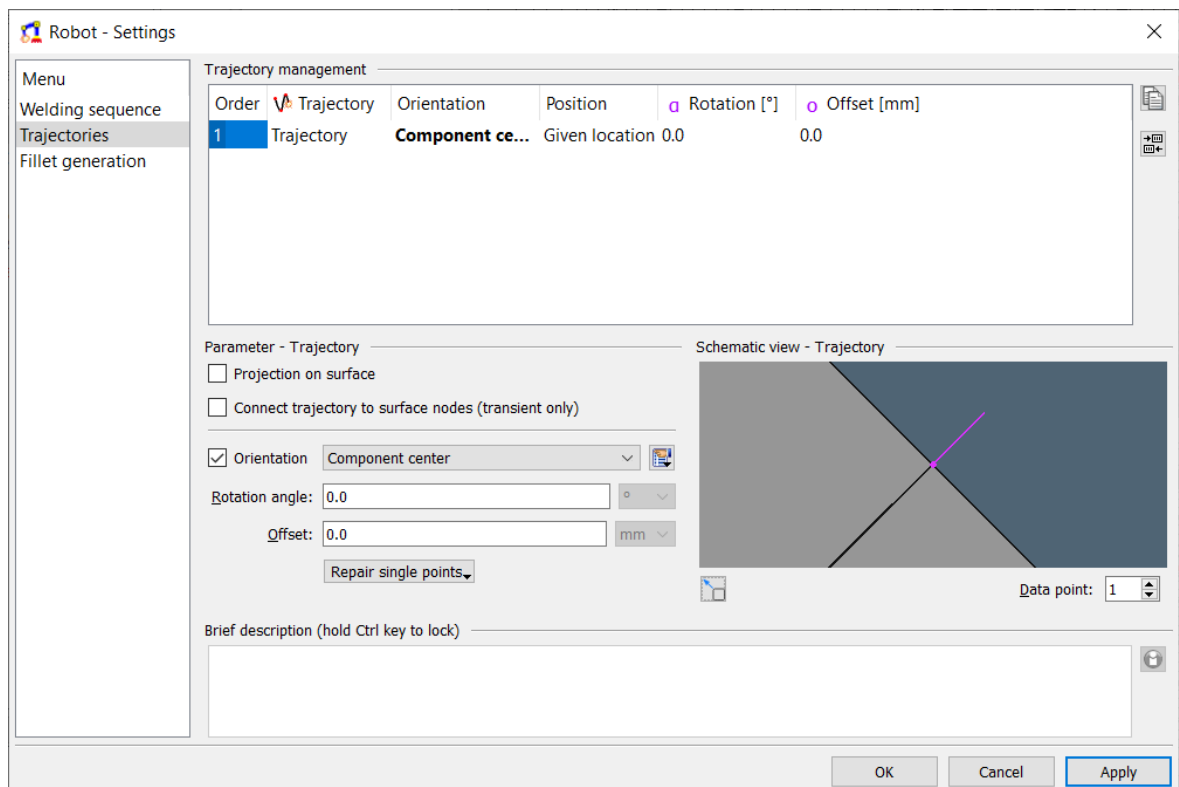
- Fronth lenght a_f : 0,5
- Rear lenght a_r : 1,2
- Width b : 0,6
- Depth d : 24
- Gaussian parameter M : 0

→ OK

Presunutí Heat source a Trajectory do Robot.



→ Robot→ Trajectories→ Orientation→ OK→ Yes



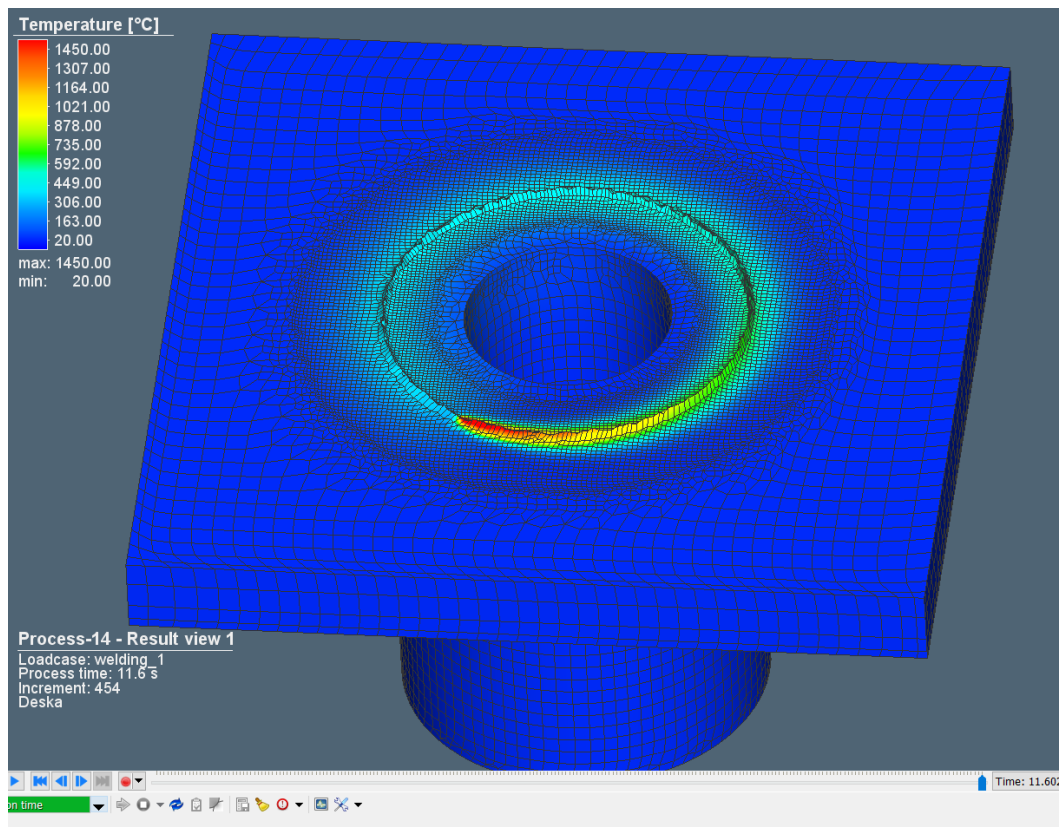
Kontrola vložení vstupních dat a spuštění procesu.

→ Process→ Model check→ Close

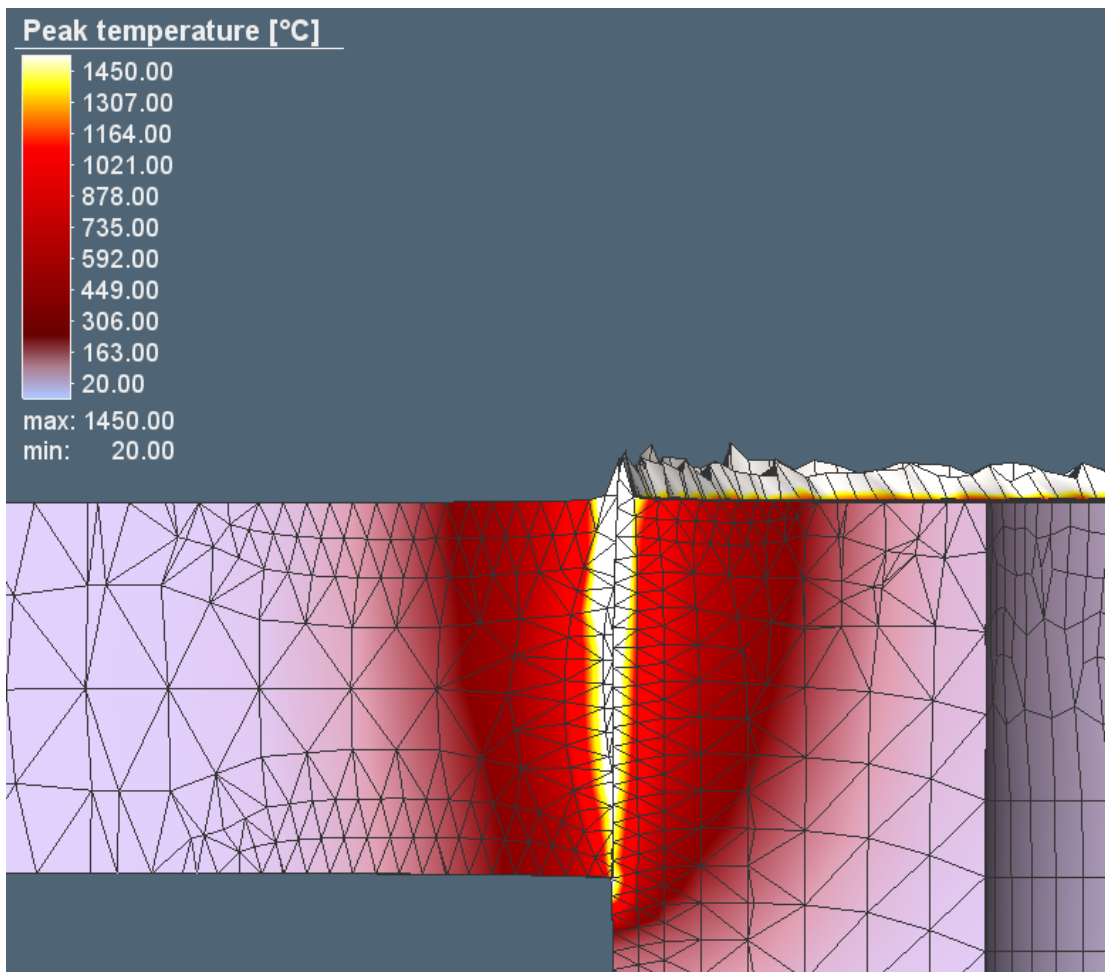
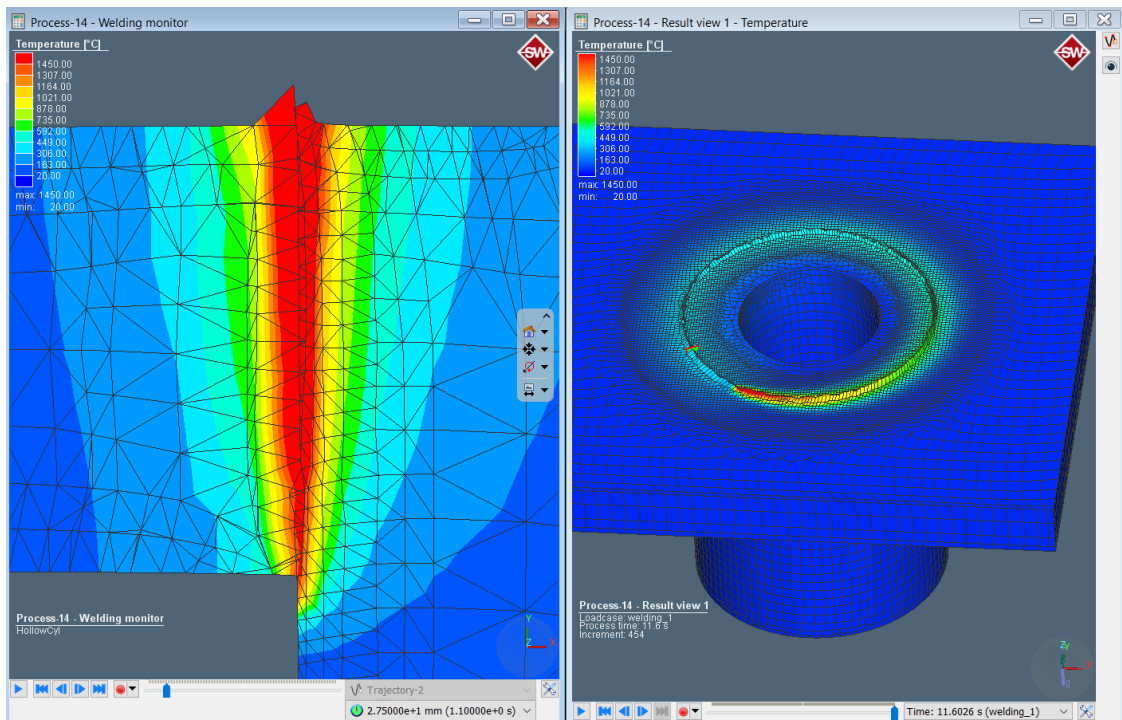
→ Start analysis→ Save→ Start analysis

Zobrazení výsledků

→ Process → Show results→ Temperature (Peak temperature, Total displacement, Effective stress)

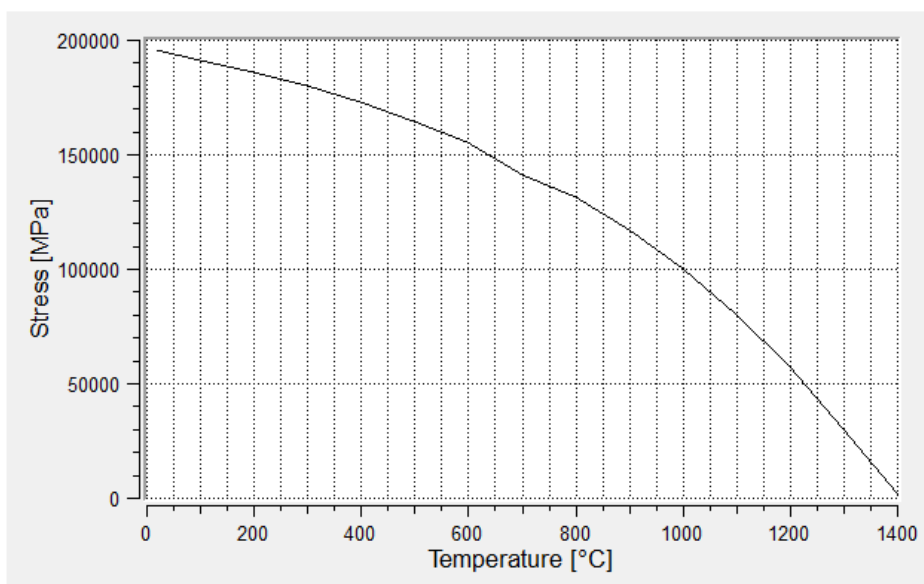


→ Welding monitor → Robot

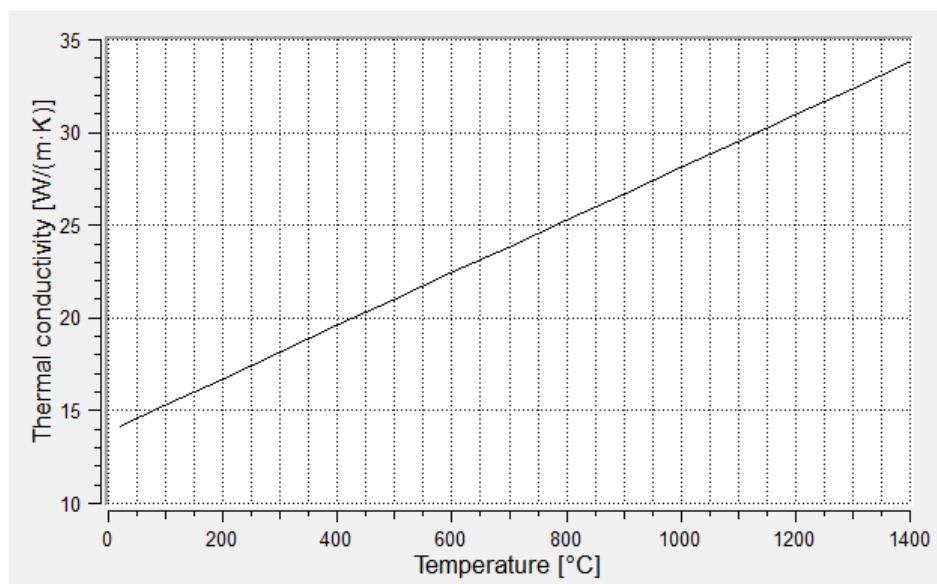


PŘÍLOHA 2 – MATERIÁLOVÁ DATA

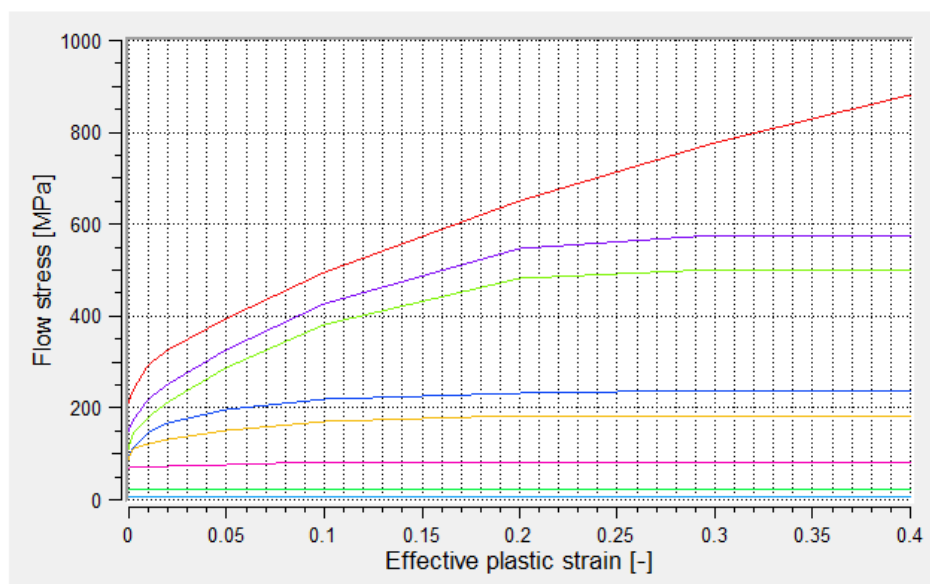
Mechanické vlastnosti



Tepelné vlastnosti



Křivky zpevnění



Materiálový list pro oceli 316, 316L, 316H



Grade Data Sheet

316 316L 316H

Specified Properties

These properties are specified for flat rolled product (plate, sheet and coil) in ASTM A240/A240M. Similar but not necessarily identical properties are specified for other products such as pipe and bar in their respective specifications.

Composition Specification (%)

| Grade | | C | Mn | Si | P | S | Cr | Mo | Ni | N |
|-------|------|-------|-----|------|-------|-------|------|------|------|------|
| 316 | min. | - | - | - | - | - | 16.0 | 2.00 | 10.0 | - |
| | max. | 0.08 | 2.0 | 0.75 | 0.045 | 0.030 | 18.0 | 3.00 | 14.0 | 0.10 |
| 316L | min. | - | - | - | - | - | 16.0 | 2.00 | 10.0 | - |
| | max. | 0.030 | 2.0 | 0.75 | 0.045 | 0.030 | 18.0 | 3.00 | 14.0 | 0.10 |
| 316H | min. | 0.04 | - | - | - | - | 16.0 | 2.00 | 10.0 | - |
| | max. | 0.10 | 2.0 | 0.75 | 0.045 | 0.030 | 18.0 | 3.00 | 14.0 | - |

Mechanical Property Specification

| Grade | Tensile Strength (MPa) min | Yield Strength 0.2% Proof (MPa) min | Elongation (% in 50mm) min | Hardness | |
|-------|-------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------|---------------------|
| | | | | Rockwell B (HR B) max | Brinell (HB) max |
| 316 | 515 | 205 | 40 | 95 | 217 |
| 316L | 485 | 170 | 40 | 95 | 217 |
| 316H | 515 | 205 | 40 | 95 | 217 |

316H also has a requirement for a grain size of ASTM No 7 or coarser.

Physical Properties

(typical values in the annealed condition)

| Grade | Density (kg/m³) | Elastic Modulus (GPa) | Mean Coefficient of Thermal Expansion | | | Thermal Conductivity | | Specific Heat (J/kg.K) | Electrical Resistivity (nΩ.m) |
|--------------|-----------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------------------|------------------------|-------------------------------|
| | | | 0-100°C (µm/m/°C) | 0-315°C (µm/m/°C) | 0-538°C (µm/m/°C) | at 100°C (W/m.K) | at 500°C (W/m.K) | | |
| 316 & 316L/H | 8000 | 193 | 15.9 | 16.2 | 17.5 | 16.3 | 21.5 | 500 | 740 |

Grade Specification Comparison

| Grade | UNS No | Euronorm | | Swedish SS | Japanese JIS |
|-------|--------|----------|-----------------|------------|--------------|
| | | No | Name | | |
| 316 | S31600 | 1.4401 | X5CrNiMo17-12-2 | 2347 | SUS 316 |
| 316L | S31603 | 1.4404 | X2CrNiMo17-12-2 | 2348 | SUS 316L |
| 316H | S31609 | - | - | - | - |

These comparisons are approximate only. The list is intended as a comparison of functionally similar materials **not** as a schedule of contractual equivalents. If exact equivalents are needed original specifications must be consulted.

Possible Alternative Grades

| Grade | Why it might be chosen instead of 316 |
|-------------|---|
| 316Ti | Better resistance to temperatures of around 600-900°C is needed. |
| 316N | Higher strength than standard 316. |
| 317L | Higher resistance to chlorides than 316L, but with similar resistance to stress corrosion cracking. |
| F18MS / 444 | Lower cost in thin gauge sheet and coil. F18MS (444) is a readily fabricated ferritic grade. |
| 904L | Much higher resistance to chlorides at elevated temperatures, with good formability. |
| 2205 | Much higher resistance to chlorides at elevated temperatures, and higher strength. |

Limitation of Liability

The information contained in this datasheet is not an exhaustive statement of all relevant information. It is a general guide for customers to the products and services available from Atlas Steels and no representation is made or warranty given in relation to this document or the products or processes it describes.

Revised Jan 2011

www.atlassteels.com.au

Page 2 of 2